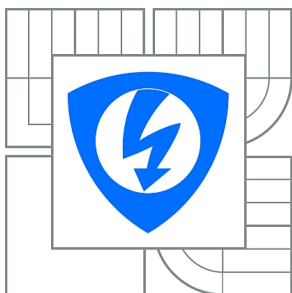




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# KASKÁDNÍ MODEL SILNOPROUDÉHO VEDENÍ PRO PLC

CASCADE MODEL OF POWER LINES FOR PLC

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MICHAL DZIURA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MIŠUREC, CSc.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Telekomunikační a informační technika**

**Student:** Bc. Michal Dziura

**ID:** 111035

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

### **Kaskádní model silnoproudého vedení pro PLC**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a rozeberte vlastnosti silnoproudých vedení a připojených součástí, které mají vliv na datový přenos po silnoproudých vedeních. Zaměřte se především na vedení na napětové hladině 230/400 V. Navrhněte vhodný počítačový model pro simulaci datové komunikace technologií PLC, založený na popisu dílčích částí, které jsou popsány kaskádními parametry. Definujte jednotlivé části, popište význam jednotlivých parametrů a jejich vliv na přenos. Provedte praktické ukázky simulací.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HRASNICA, HAIDINE, LEHNERT. Broadband Powerline Communications Network design, ISBN:0-470-85741-2, 2004.
- [2] DOSTERT, Klaus. Powerline Communications. Upper Saddle River, NJ 07458 : Prentice Hall PTR, 2001. 338 s. ISBN 0-13-029342-3.
- [3] AHOLA, J. Applicability of power-line communications to data transfer of on-line condition monitoring of electrical drives. Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology). Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta 2003, ISBN 951-764-783-2, ISSN 1456-4491, 2003.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 24.5.2012

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa zaoberá problematikou prenosu dát po energetickej sieti. Rozoberá technológiu PLC, vlastnosti, použitie a prvky tejto siete. Dôležitou časťou práce je rozobranie matematického modelu distribučnej siete s kaskádnyimi dvojbranmi. Prenosové funkcie vytvorené pomocou tohto modelovania boli vzájomne porovnávané. Na záver bol sledovaný vplyv väzbových členov na prenosovú funkciu navrhnutého vedenia s odbočkami. Tie boli spracované v programe Matlab a navzájom porovnávané.

## **Abstract**

The thesis is dealing with data transmission over the electric network. It describes PLC technology, its properties, and elements used in this type of network. The important part of this thesis is discussion over the mathematical model of distribution network with two-port cascades. Transmission functions created according to mathematical model were compared with each other. Thesis was concluded with observation of the impact of interconnected parts on transmission function of designed branched conductor. Final results were processed by Matlab and compared with each other.

## **Kľúčové slová**

PLC, kaskádne parametre, modelovanie, prenosová funkcia, silnoprúdové vedenie, dvojbran, väzbový člen

## **Keywords**

PLC, cascade parameters, modeling, transfer function, power lines, two-ports, coupler

## **Bibliografická citace práce**

DZIURA, M. *Kaskádní model silnoproutého vedení pro PLC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 87 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc..

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Kaskádní model silnoprůdého vedení pro PLC jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24.5.2012

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

# Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>10</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>13</b>
<b>ROZBOR ZADANIA.....</b>	<b>14</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2 HISTÓRICKÝ PREHĽAD .....</b>	<b>16</b>
2.1 ENERGETICKÉ ROZVODNÉ SIETE .....	16
2.2 ÚZKOPÁSMOVÉ PLC SIETE .....	17
2.3 ŠIROKOPÁSMOVÉ PLC SIETE .....	19
2.4 ZÁKLADNÉ PRVKY SIETE .....	19
2.5 REPEATER (OPAKOVAČ) .....	20
2.6 PLC GATEWAY .....	21
<b>3 PARAMETRE VEDENIA .....</b>	<b>23</b>
3.1 PARAMETRE VONKAJŠÍCH VEDENÍ .....	24
3.2 REZISTANCIA VEDENIA (MERNÝ ODPOR) .....	24
3.3 INDUKČNOSŤ VEDENIA .....	25
3.4 KONDUKTANCIA VEDENIA (MERNÝ ZVOD) .....	26
3.5 KAPACITA VEDENIA (MERNÁ KAPACITA) .....	27
3.6 MERNÁ MIERA PRENOSU .....	28
3.7 CHARAKTERISTICKÁ IMPEDANCIA .....	28
<b>4 PRAKTICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>29</b>
4.1 PRÍPRAVA MERANIA ŠIROKOPÁSMOVEJ SIETE .....	29
4.2 ZARIADENIA V ŠIROKOPÁSMOVEJ SIETI .....	29
4.2.1 AMH-200 .....	29
4.2.2 AMH-201F .....	30
4.2.3 AGW-200 .....	30
4.3 NASTAVENIE KONFIGURÁCIE .....	30
4.4 SPEKTRÁ SIGNÁLU V ŠIROKOPÁSMOVEJ SIETI .....	31
4.5 MERANIE RÝCHLOSTÍ V ŠIROKOPÁSMOVEJ SIETI .....	33
4.6 PRÍPRAVA MERANIA ÚZKOPÁSMOVEJ SIETE .....	35
4.7 KONFIGURÁCIA MODEMOV .....	35

4.8 NASTAVENIE KOMUNIKÁCIE.....	36
4.9 ZOBRAZENIE SPEKTIER V ÚZKOPÁSMOVEJ SIETI .....	38
<b>5 VÄZBOVÉ ČLENY.....</b>	<b>40</b>
5.1 KAPACITNÝ VÄZBOVÝ ČLEN MCB10.2 .....	40
5.2 INDUKTIVNÝ VÄZBOVÝ ČLEN ICU-438.....	40
5.3 MODEL VÄZBOVÉHO ČLENA.....	41
5.4 MERANIE IMPEDANCIE VÄZBOVÝCH ČLENOV .....	45
5.5 NÁVRH MODELU VÄZBOVÉHO ČLENA MCB10.2 .....	47
<b>6 TEÓRIA MODELOVANIA .....</b>	<b>49</b>
6.1 PLC KOMUNIKAČNÝ SYSTÉM.....	49
6.2 NÁHRADNÝ MODEL VEDENIA .....	49
6.3 MODELOVANIE PLC KANÁLU .....	50
6.4 PROSTREDIE S VIACCESTNÝM ŠÍRENÍM .....	51
6.5 PRENOSOVÁ FUNKCIA PROSTREDIA S VIACCESTNÝM ŠÍRENÍM.....	51
6.6 KASKÁDNE PARAMETRE VEDENIA DVOJBRANU .....	52
6.7 PRENOSOVÁ FUNKCIA DVOJBRANU .....	54
6.8 PRENOSOVÁ FUNKCIA DVOJBRANU S ODBOČKAMI.....	55
<b>7 MODELOVANIE SILNOPRÚDOVÉHO VEDENIA .....</b>	<b>58</b>
7.1 VÝPOČET PRIMÁRNYCH A SEKUNDÁRNYCH PARAMETROV .....	58
7.2 MODELOVANIE VEDENIA KASKÁDNymi PARAMETRAMI.....	61
7.3 VPLYV NA PRENOSOVÚ FUNKCIU .....	62
<b>8 PRAKTICKÉ MERANIA PRENOSOVEJ FUNKCIE.....</b>	<b>67</b>
8.1 MERANIA S JEDNOU ODBOČKOU .....	67
8.2 MERANIA S DVOMA ODBOČKAMI .....	68
8.3 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ .....	70
8.4 GRAFY S JEDNOU ODBOČKOU .....	71
8.5. GRAFY S DVOMA ODBOČKAMI .....	74
8.6 ZHODNOTENIE.....	77
<b>5 ZÁVER .....</b>	<b>78</b>
<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>	<b>79</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV .....</b>	<b>82</b>
SKRATKY .....	82
SYMBOLY .....	82



ZOZNAM PRÍLOH .....	86
---------------------	----

# Zoznam obrázkov

Obr. 4.1: Schéma širokopásmovej siete .....	30
Obr. 4.2: Nastavenie NMS .....	31
Obr. 4.3: Úroveň signálu bez sťahovania súboru. ....	32
Obr. 4.4: Úroveň signálu pri sťahovaní súboru z internetu. ....	32
Obr. 4.5: Krivka SNR pre zariadenie He. ....	34
Obr. 4.6: Zapojenie CPE zariadenia na 3. poschodí. ....	35
Obr. 4.7: Schéma zapojenia úzkopásmovej siete. ....	35
Obr. 4.8: Nastavenie konfigurácie modemu pomocou programu RSET. ....	36
Obr. 4.9: Nastavenie Hyperterminálu. ....	37
Obr. 4.10: Odosielanie a príjem súboru. ....	37
Obr. 4.11: Prenos súboru. ....	37
Obr. 4.12: Spektrum signálu bez prenášania súboru. ....	38
Obr. 4.13: Úroveň signálu pri prenose súboru. ....	38
Obr. 4.14: Úroveň signálu pri prenose súboru. Nosné signály sú v okolí frekvencie 80 kHz. ....	39
Obr. 4.15: Úroveň signálu pri rušení. Vidieť nárast úrovne signálu na kitočoch 6-150 kHz. ....	39
Obr. 5.1: Vážbový člen MCB10.2. ....	40
Obr. 5.2: Vážbový člen ICU-438. ....	41
Obr. 5.3: Schéma vážbového člena. ....	41
Obr. 5.4: Model vážbového člena. ....	42
Obr. 5.5: Frekvenčná závislosť modulu sériovej časti vážbového člena. ....	43
Obr. 5.6: Frekvenčná závislosť modulu paralelnej časti vážbového člena. ....	44
Obr. 5.7: Frekvenčná závislosť modulu vážbového člena. ....	44
Obr. 5.8: Schéma zapojenia pri meraní impedancie vážbového člena MCB10.2. ....	45
Obr. 5.9: Zobrazenie kalibrácie vektorového analyzátora. ....	46
Obr. 5.10: Odmeraná impedancia vážbového člena MCB10.2. ....	46
Obr. 5.11: Odmeraná impedancia vážbového člena ICU-438. ....	47
Obr. 5.12: Obvodová schéma vážbového člena MCB10.2. ....	47
Obr. 5.13: Navrhnutý model vážbového člena so zdrojom striedavého napätia. ....	48
Obr. 5.14: Celková impedancia navrhnutého modelu. ....	48
Obr. 6.1. Náhradná schéma vedenia. ....	50

Obr. 6.2: Model PLC kanálu. ....	50
Obr. 6.3: Distribúcia signálu cez silové vedenie. ....	51
Obr. 6.4: Model vedenia s viaccestným šírením. ....	52
Obr. 6.5: Dvojbran.....	52
Obr. 6.6: Zapojený dvojbran so zdrojom a záťažou. ....	54
Obr. 6.7: Zjednodušené vedenie s jednou odbočkou. ....	55
Obr. 6.8: a) vedenie s troma odbočkami, b) zjednodušené vedenie s 3 odbočkami. ....	56
Obr. 7.1: Primárne parametre kábelu CYKY 3x1,5. ....	60
Obr. 7.2: Sekundárne parametre kábelu CYKY 3x1,5. ....	60
Obr. 7.3: a) Vedenie s troma odbočkami, b) zjednodušené vedenie s troma odbočkami. ....	61
Obr. 7.4: Topológia zapojenia. ....	63
Obr. 7.5: Prenosová funkcia s jednou odbočkou. ....	64
Obr. 7.6: Prenosová funkcia s jednou odbočkou, dĺžka odbočiek sa zmenila z 5m na 20m. ....	64
Obr. 7.7: Prenosová funkcia s jednou odbočkou, impedancia odbočiek sa zmenila z 100 $\Omega$ na 250 $\Omega$ . ....	65
Obr. 7.8: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami. ....	65
Obr. 7.9: Prenosová funkcia s troma odbočkami. ....	66
Obr. 7.10: Prenosová funkcia so štyrmi odbočkami. ....	66
Obr. 8.1: Schéma merania prenosovej funkcie s jednou odbočkou. ....	67
Obr. 8.2: Zjednodušená schéma zapojenia väzbového člena. ....	68
Obr. 8.3: Zjednodušená schéma pri meraniach s dvojistou odbočkou. ....	69
Obr. 8.4: Prenosová funkcia bez odbočky a s väzbovým členom MCB10.2. ....	71
Obr. 8.5: Prenosová funkcia s odbočkou (kábel nakrátko) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	71
Obr. 8.6: Prenosová funkcia s odbočkou (kábel naprázdno) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	72
Obr. 8.7: Prenosová funkcia s odbočkou (modem) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	72
Obr. 8.8: Prenosová funkcia bez odbočky a s väzbovým členom ICU-438. ....	73
Obr. 8.9: Prenosová funkcia s odbočkou (modem) a s väzbovým členom ICU-438. ....	73
Obr. 8.10: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, modem) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	74
Obr. 8.11: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, kábel naprázdno) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	74

Obr. 8.12: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, kábel nakrátko) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	75
Obr. 8.13: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (kábel naprázdno, modem) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	75
Obr. 8.14: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (kábel nakrátko, modem) a s väzbovým členom MCB10.2. ....	76
Obr. 8.15: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, modem) a s väzbovým členom ICU-438. ....	76

# Zoznam tabuliek

Tab. 2.1: CELENEC norma pre komunikáciu cez rozvodnú sieť. ....	17
Tab. 4.1: Prenosové rýchlosti zariadení CPE, HE, REP.....	33
Tab. 4.2: Prenosová rýchlosť na aplikačnej vrstve.....	33
Tab. 4.3 Meranie prenosových rýchlostí na 3 poschodí na fyzickej vrstve.....	34
Tab. 4.4: Meranie prenosových rýchlostí na 3 poschodí na aplikačnej vrstve.....	34
Tab. 5.1: Základné parametre väzbového člena ICU-438. ....	41
Tab. 7.1: Použité veličiny pri výpočte primárnych a sekundárnych parametrov. ....	59
Tab. 7.2: Parametre navrhnutého vedenia. ....	61

# Rozbor zadania

Cieľom teoretickej časti bolo preštudovať a rozobrať vlastnosti silnoprúdových vedení predovšetkým na napäťovej hladine 230/400 V. Práca zahŕňa význam primárnych a sekundárnych parametrov a ich vplyv na prenos. V semestrálnom projekte bola zostavená širokopásmová a úzkopásmová sieť pre lepšie sa zoznámenie s technológiou PLC. V oboch prípadoch boli pomocou osciloskopu zmerané spektrá komunikácie a v širokopásmovej sieti boli zmerané aj rýchlosti na aplikačnej a fyzickej vrstve. Diplomová práca sa zameriava na metódu modelovania pomocou dvojbranov. Je rozobraná podrobne.

Praktická časť sa zaoberá v podstatnej miere modelovaním pomocou dvojbranov. Boli zvolené topológie a na základe nich namodelované prenosové funkcie. Na základe dohody s vedúcim práce, bol v tejto práci zisťovaný vplyv väzbových členov MCB10.2 a ICU-438 na prenosovú funkciu vedenia. V práci je zmeraná impedancia týchto členov a navrhnutý model pre väzbový člen MCB10.2 na základe zmeranej impedancie. Pri meraní prenosovej funkcie s väzbovými členmi boli navrhnuté topológie bez odbočky, s jednou odbočkou a s dvoma odbočkami.

# 1 Úvod

Prenos dát po rozvodoch energetickej siete nie je novou myšlienkou. Je možné využívanie rozvodov, ktoré sú k dispozícií všade tam, kam siaha civilizovaný svet. [1] Hlavnou myšlienkou PLC je zníženie nákladov a výdavkov na realizáciu nových telekomunikačných sietí. Vysoké prípadne stredné napätie energetickej rozvodnej siete môže byť použité na prenos dát na dlhšie vzdialenosti, a v takom prípade je možné ušetriť na stavbe ďalších komunikačných sietí. Nízke napätie rozvodnej siete má k dispozícií množstvo domácností a preto môže slúžiť na vytvorenie prístupovej PLC siete, ktorá má za úlohu prekonať tzv. „poslednú míľu“. [2]

Použitie PLC je možné prakticky všade, kde je k dispozícií rozvodná elektrická sieť, prípadne televízne rozvody a kde je potrebné vybudovať dátovú komunikáciu. Je ideálnym riešením na rozšírenie existujúcich dátových sietí realizovaných klasickým spôsobom. Vhodná je aj na rozšírenie existujúcich sietí v priestoroch, kde neboli plánované, prípadne aj ako dočasné riešenie pre výstavy či školenia. Veľmi perspektívnou oblasťou pre použitie tejto technológie je riešenie širokopásmového internetového pripojenia na sídliskách. [1]

V úvode práce je rozobraná technológia PLC. Popisuje širokopásmovú a úzkopásmovú sieť, a zároveň jej jednotlivé časti. Pre lepšie zoznámenie sa s touto technológiou, bola vytvorená širokopásmová a úzkopásmová sieť. V práci sú rozobrané aj primárne a sekundárne parametre vedenia. Hlavnou úlohou tejto práce je rozobrať teóriu modelovania pomocou kaskádnych dvojbranov. Na základe tejto teórie bola vypočítaná a namodelovaná prenosová funkcia pre vytvorené topológie vedenia. Praktická časť práce je zameraná na meranie prenosovej funkcie bez odbočky, s jednou odbočkou a s dvoma odbočkami vedenia. V tomto vedení sa nachádzajú väzbové členy MCB10.2 a ICU-438. Skúmaný je vplyv týchto členov na prenosovú funkciu vedenia. Pre obe väzbové členy sú zmerané impedancie a pre člen MCB10.2 je navrhnutý model na základe nameranej impedancie člena.

## 2 Histórický prehľad

PowerLine Communication (PLC) sa používa na účely komunikácie v elektrických napájacích sieťach. Elektrickú distribučnú sieť je tiež možné použiť ako médium na prenos rôznych telekomunikačných služieb. Hlavnou myšlienkou PLC je zníženie nákladov a výdavkov na realizáciu nových telekomunikačných sietí. Vysoké príp. stredné napätie energetickej rozvodnej siete môže byť použité na prenos dát na dlhšie vzdialenosti, a v takom prípade je možné ušetriť na stavbe ďalších komunikačných sietí. Nízke napätie rozvodnej siete má k dispozícii množstvo domácností, a preto môže slúžiť na vytvorenie prístupovej PLC siete, ktorá má za úlohu prekonať tzv. „poslednú míľu“. [2] Historicky sa snahy prenášať dáta po napájacích (silových) vedeniach skutočne týkali predovšetkým problému preklenutia poslednej míle. [3]

PLC sa používa v rámci budov a domov, kde vnútorná elektroinštalácia slúži na realizáciu domácej PLC siete. Myšlienka PLC je známa od začiatku dvadsiateho storočia. Prvý systém s nosnou frekvenciou (Carrier Frequency Systems - CFS) bol prevádzkovaný vo vysokonapäťových elektrických sieťach. Tie dokázali prekonať vzdialenosť viac ako 500 km pri použití prenášanom výkone 10 W. Tento typ systémov slúži k vnútornej komunikácii elektrických prístrojoch a diaľkovému odčítaniu merania a kontrole. Prvé systémy pre prenos signalizácie nosnou vlnou (Ripple Carrier Signaling - RCS) boli použité na nízkych a stredných napäťových sieťach na ovládanie elektrických napájacích systémov.

Vnútorné elektrické siete sa využívali na rôzne automatizačné služby. Aplikácie PLC systémov v domácom prostredí poskytujú správu rôznych elektrických zariadení v budovách a rodinných domoch z centrálného riadiaceho miesta a to bez nutnosti inštalácie ďalších komunikačných sietí. Typické PLC systémy založené na automatizačných systémoch slúžia na dodržiavanie bezpečnosti, ovládanie osvetlenia a vykurovacích zariadení, atď.[2]

### 2.1 Energetické rozvodné siete

Ako prenosové médium pre vytvorenie PLC siete je možné použiť elektrický napájací systém, ktorý sa skladá z troch sieťových úrovní.

Sieťové úrovne :



- Veľmi vysoké napätie (110-380 kV) siete spája elektrárne s veľkými zásobovacími oblasťami, príp. s veľkými odberateľmi. Pomocou energetických centrál je umožnené v rámci kontinentu prekonávať veľmi dlhé vzdialenosti. Tieto siete sú realizované nadzemnými káblami.
- Vysoké napätie (10-30 kV) siete zásobuje menšie plochy, mestá, väčšie priemyselné firmy. Vzdialenosti sú výrazne kratšie ako v sieťach veľmi vysokého napätia. Tieto siete je možné realizovať ich nadzemným vedením alebo káblami uloženými v zemi.
- Nízke napätie (230/400 V, v USA 110 V) sietí je dodávané koncovým odberateľom. Ich dĺžka je niekoľko sto metrov. V mestských oblastiach sú tieto siete uložené v zemi, na vidieku zvyčajne tvoria nadzemné vedenie. [2]

## 2.2 Úzkopásmové PLC siete

Úzkopásmové PLC siete pracujú vo frekvenčnom rozsahu podľa normy CENELEC (viď. tab. 2.1). Táto norma rozdeľuje frekvenčné pásmo do troch skupín.

**Tab. 2.1: CELENEC norma pre komunikáciu cez rozvodnú sieť. [2]**

Skupina	Frekvenčný rozsah (kHz)	Max. prenosová amplitúda (V)	Užívateľské prostredie
A	9-95	10	Distribútori
B	95-125	1,2	Domácnosť
C	125-140	1,2	Domácnosť

Skupinu A využívajú distribútori, skupiny B a C sú k dispozícii pre domáce použitie. Zariadenia používajú úzkopásmové PLC na realizáciu služieb súvisiacich s energiou. V dnešnej dobe PLC systémy poskytujú rýchlosť až niekoľko tisíc bitov za sekundu. Maximálna vzdialenosť, ktorá môže byť medzi dvoma modemami je 1 km. Ak je potrebné prekonať dlhšiu vzdialenosť, je nutné použiť opakovač. V týchto systémoch sa používajú rôzne modulačné techniky. Prvé úzkopásmové PLC siete boli implementované amplitúdovou moduláciou (Amplitude Shift Keying - ASK). V PLC sieti sa ASK nepoužíva, pretože nie je odolná voči rušeniu. Medzi odolnú modulačnú techniku proti rušeniu patrí dvojstavové kľúčovanie fázovým posunom (Binary Phase Shift Keying - BPSK), a preto je vhodná pre použitie v PLC sieti. Problém však vytvára detekcia fázy, ktorá je pre vytvorenie BPSK

nevyhnutná, môže byť zložitá, a preto sa táto modulácia často nepoužíva. Najnovšie úzkopásmové PLC systémy používajú modulačnú techniku Frequency Shift Keying (FSK).

Širokopásmové modulačné techniky sú taktiež používané v úzkopásmových PLC systémoch. Medzi výhody širokopásmových modulačných techník patria rôzne varianty rozprostrenia spektra, odolnosť voči úzkopásmovému šumu a selektívnemu útlmovému efektu. V úzkopásmových PLC systémoch sa používa ďalšia modulačná technika ortogonálny frekvenčný multiplex (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). [2]

Budovy patria medzi veľmi dôležitú oblasť pre použitie úzkopásmových PLC. Ak je PLC založená na automatizačných systémoch, nie je potrebné vytvárať ďalšie komunikačné siete. Vysoké náklady, ktoré vznikajú pri budovaní komunikačných sietí v rámci existujúcich budov klesnú využívaním technológie PLC. Automatizačné systémy realizované pomocou PLC je možno použiť na rôzne ciele:

- Ovládanie rôznych zariadení, ktoré sú pripojené k vnútornej elektroinštalácii (osvetlenia, vykurovania, klimatizácie, výťahov, atď.)
- Centrálné ovládanie systémov (riadenie okien, ovládanie dverí, atď.)
- Zabezpečovacie úlohy, dohľad, prepojenie čidiel, atď.

PLC založené na automatizačných systémoch sa nepoužíva iba vo veľkých budovách, ale taktiež v domácnostiach na plnenie podobných úloh. Týmto domácnostiam sa hovorí „inteligentné domy“. PLC modemy navrhnuté podľa štandardu Powerline-BUS (European Installation Bus) je možné ľahko pripojiť do akejkoľvek zásuvky alebo tiež integrované zariadenie sa dá pripojiť do elektrickej inštalácie. Týmto spôsobom je zabezpečená komunikácia medzi všetkými časťami vnútornej elektrickej siete. V súčasnej dobe, PLC modemy pomocou FSK dosahujú prenosovú rýchlosť až 1200 bps.

Podľa normy CENELEC je možné používať napájacie zariadenia v pásme A pre realizáciu tzv. energetických služieb. Takto je možné uskutočniť vnútornú komunikáciu medzi riadiacim centrom a ďalším zariadením, či zabezpečiť vzdialené ovládanie bez toho, aby sa inštalovala ďalšia telekomunikačná sieť. PLC je možné použiť aj na diaľkové meranie zákazníckej spotreby energie, čo šetrí náklady na personál pri manuálnom odčítaní.[2]

## 2.3 Širokopásmové PLC siete

Oproti úzkopásmovým systémom, širokopásmové PLC systémy poskytujú oveľa vyššie prenosové rýchlosti (viac ako 2 Mbps). Tieto siete ponúkajú vytvorenie zložitejších telekomunikačných služieb, viac hlasových pripojení, vysokorýchlostný prenos dát, prenos video signálu a úzkopásmové služby. Preto širokopásmové PLC systémy sú považované za schopnú telekomunikačnú technológiu. Pri realizácii širokopásmových služieb po energetickej sieti, nie je potrebné ukladať nové káble pre telekomunikačnú sieť. Ale ak, elektrické napájacie siete nie sú určené na prenos informácií, a preto v nej existujú limitujúce faktory pri použití širokopásmovej PLC technológie. Z tohto dôvodu vzdialenosti, ktoré tam môžu byť zahrnuté, rovnako ako rýchlosť dát, ktoré možno realizovať PLC systémami, sú limitované. Elektromagnetická kompatibilita je ďalším dôležitým faktorom pri použití širokopásmových PLC. Pri tvorbe širokopásmových PLC systémov potrebujeme výrazne širšie frekvenčné spektrum (až do 30 MHz), ako je stanovené v rámci normy CENELEC. Zároveň, PLC sieť sa správa ako anténa, je zdrojom šumu pre iné komunikačné systémy, pracujúce v rovnakom frekvenčnom rozsahu. Tieto systémy teda pracujú s obmedzeným výkonom signálu, a to znižuje ich výkonnosť (prenosovú rýchlosť, vzdialenosť). [2]

Prenosová rýchlosť, ktorú môžu poskytnúť širokopásmové PLC systémy, je až 2 Mbps vo vonkajších oblastiach (obsahujú stredné a nízke napätia siete), a až 12 Mbps v domacom prostredí (in-home system). V súčasnej dobe niektorí výrobcovia vytvorili prototypy produktov, ktoré dokážu poskytnúť oveľa vyššie rýchlosti (cca 100 Mbps). Na prekonanie vzdialenosti až niekoľko stoviek metrov a realizáciu point to point sa používa stredno-napäťová technológia. Tento systém sa používa v oblastiach na prepojenie lokálnych sietí (LAN), sietí medzi bunkami alebo v rámci areálu, a na prepojenie antén a základných staníc mobilných komunikačných systémov ich chrbticovej siete. Na realizáciu tzv. „poslednej míle“ sietí telekomunikačných prístupov sa používa nízko-napäťová PLC technológia. Na rozdiel od úzkopásmových systémov, nie sú uvedené normy, ktoré platia pre širokopásmové PLC siete. [2]

## 2.4 Základné prvky siete

Základné PLC sieťové prvky sú nevyhnutné pre realizáciu komunikácie cez elektrické obvody. Hlavnou úlohou týchto základných prvkov je príprava a prevod signálu cez rozvody

elektrickej siete, rovnako ako aj príjem tohto signálu. Nasledujúce dve zariadenia existujú v každej prístupovej PLC sieti :

- PLC modem
- PLC základňa / riadiaca stanica.

PLC modem sa pripojí cez štandardné komunikačné zariadenie, používané účastníkom, k Powerline prenosovému médiu. Užívateľské rozhranie môže poskytnúť rôzne štandardy a rozhrania pre komunikačné zariadenia (napr. Ethernet, Universal Serial Bus – USB). Na druhej strane je PLC modem k elektrickej rozvodnej sieti pripojený pomocou špecifickej spojovacej metódy, ktorá umožňuje odosielanie a príjem komunikačných signálov do alebo z elektrickej siete. [2]

Aby boli znížené elektromagnetické emisie, je potrebná realizácia spojenia medzi dvoma fázami v prístupovej oblasti a to medzi fázou a nulovým vodičom vo vnútornej oblasti. Spojenie zaisťuje bezpečné galvanické oddelenie. Pôsobí ako vysokoútlmový filter. Ten oddelí komunikačné signály (nad 9 kHz) od elektrického prúdu (50 alebo 60 Hz). PLC modem implementuje všetky funkcie fyzickej vrstvy vrátane modulácie a kódovania. Druhá komunikačná vrstva (linková vrstva) je realizovaná v rámci modemu vrátane MAC (Medium Access Control) a LLC (Logical Link Control) podvrstiev (podľa OSI (Open Systems Interconnection) referenčného modelu. [2]

Prístup do chrbticovej siete je zabezpečený pomocou základňovej PLC stanice. Tá vytvára spojenie medzi chrbticovou komunikačnou sieťou a prenosovým médiom. Základňová stanica neslúži iba k spojeniu účastníckych zariadení, poskytuje tiež viac sieťových komunikačných rozhraní (xDSL, Synchronous Digital Mierarch (SDH), WLL, ...). Základňovú PLC stanicu je možné použiť pre realizáciu spojenia s chrbticovou sieťou prostredníctvom rôznych komunikačných technológií. Obvykle základňová stanica riadi prevádzku v PLC prístupovej sieti, je však možné, že vytvorenie riadenia siete alebo jej jednotlivých funkcií je vytvorená distribuovaným spôsobom. V špeciálnom prípade môže každý PLC modem prevziať kontrolu nad sieťovým provozom a realizáciu pripojenia na chrbticovú sieť. [2]

## **2.5 Repeater (opakovač)**

V niektorých prípadoch, vzdialenosti medzi PLC odberateľmi umiestnené v nízkom napätí siete a medzi jednotlivými odberateľmi a základňovou stanicou sú príliš dlhé, aby

mohli byť spojené cez PLC prístupovú sieť. Aby bolo možné zrealizovať sieť na dlhšie vzdialenosti, je nutné použiť opakovač. Opakovače rozdeľujú prístupovú PLC sieť na niekoľko segmentov, podľa dĺžky, ktorá je prekonávaná v PLC systéme. Segmenty siete sú oddelené pomocou rôznych frekvenčných pásem, alebo podľa rôznych časových slotov. Časový slot je použitý pre prenos v prvom segmente siete a ďalší slot pre druhý segment siete.

V prípade frekvencie založenej na segmentácii siete, opakovač prijíma prenos signálu na frekvencii  $f_1$ , zosilní ho a vloží ho do siete, ale na frekvencii  $f_2$ . V opačnom smere prenosu, sa premena signálu uskutočňuje na frekvencii  $f_2$  a vloží ho na frekvenciu  $f_1$ . V závislosti na použitom prenose a modulačnej metóde, funkcie opakovača môžu zahŕňať demoduláciu a moduláciu vysielaného signálu, rovnako ako jeho spracovanie na vyššej sieťovej vrstve. Avšak, opakovač nemení obsah prenášaných informácií, ktoré sú vždy transparentne prenášané medzi segmentmi siete celého prístupového systému. [2]

V prvom segmente siete, medzi základňovou stanicou, ktorá je umiestnená v transformačnej jednotke a opakovačom, je signál vysielaný vo frekvenčnom pásme  $f_1$ . Ďalší frekvenčný rozsah  $f_2$  musí byť použitý v druhom segmente siete. Teoreticky by frekvenčný rozsah mohol byť použitý v rámci tretieho segmentu siete, lenže ak sa tam nachádza interferencia medzi signálmi z prvého segmentu, tretí frekvenčný rozsah  $f_3$ , musí byť aplikovaný na treťom segmente siete a frekvencia  $f_4$  na štvrtom segmente siete.

No, ak je tam obmedzené frekvenčné spektrum, v ktorom je možné použiť PLC technológiu (približne do 30 MHz), tak s rastúcim počtom rôznych frekvenčných pásem, sa spoločné pásma rozdeľujú na menšie časti, čo výrazne znižuje kapacitu siete. Preto, frekvenčný plán pre prístup k PLC sieti musí zabezpečiť použitie čo najnižšieho počtu frekvencií, ak je to možné. Použitím opakovačov je možné rozšíriť vzdialenosti siete, ktoré sú realizované pomocou PLC technológie. Každý opakovač, ktorý sa nachádza v sieti zvyšuje náklady na sieť, lebo rastie počet zariadení a náklady na ich inštaláciu. Preto, musí byť počet opakovačov v prístupovej PLC sieti čo najmenší. [2]

## 2.6 PLC Gateway

Existujú dva prístupy k pripojeniu PLC účastníkov cez zásuvky k PLC sieti:

- Priame spojenie
- Nepriame spojenie cez bránu

V prvom prípade sú PLC modemy priamo napojené na celú sieť nízkeho napätia, tým aj na základňovú PLC stanicu. Nenachádza sa tam žiadny rozdiel medzi vonkajšou a vnútornou oblasťou, signál je prenášaný cez meraciu jednotku. Ale funkcie vnútorných a vonkajších napájacích sietí sú odlišné, čo spôsobuje problémy týkajúce sa vlastností PLC prenosového kanálu a problémy s elektromagnetickou kompatibilitou. Preto sa nepriame pripojenie pomocou brány často používa ako riešenie pre priame pripojenie zásuviek do celej PLC prístupovej siete. [2]

Na rozdelenie prístupovej PLC siete a domácej PLC siete sa používa brána. Mení prenášaný signál medzi frekvenciami, ktoré sú určené pre použitie v prístupovej a domácej oblasti. Je umiestnená zvyčajne v blízkosti meracieho zariadenia. Brána poskytuje aj ďalšie funkcie, ktoré zaisťujú rozdelenie prístupovej a domácej oblasti na logickej úrovni siete. PLC modem pripojený v domácej sieti môže komunikovať vo vnútri bez informácií z prístupovej oblasti. V tomto prípade brána slúži ako miestna základňová stanica, ktorá riadi v domácej sieti PLC koordináciu komunikácie medzi internými PLC modemami, a tiež medzi vnútornými zariadeniami a prístupovou PLC sieťou. [2]

Všeobecne brána môže byť umiestnená kdekoľvek v PLC prístupovej sieti na regeneráciu a sieťové rozdelenie na logickej úrovni obom signálom. Týmto spôsobom je možné PLC rozdeliť do niekoľkých oddelených sietí, ktoré používajú rovnaké fyzické prenosové médium, ale existujú oddelene ako druh virtuálnej siete.

Dve brány, fungujú ako PLC opakovače a prevádzajú prenos signálu medzi frekvenciami  $f_1$  a  $f_2$  (alebo časovými slotmi  $T_1$  a  $T_2$ ), ako aj medzi  $f_2$  a  $f_3$  ( $T_2$  a  $T_3$ ). Brány ovládajú podsiete II. a III., čo znamená, že za internú komunikáciu v rámci podsiete preberá zodpovednosť brána a nemá vplyv na ostatné prístupové siete. Komunikácia medzi členmi podsiete a základňovej stanice je možný len cez zodpovednú bránu. Sieť môže byť organizovaná aj tak, že základňová stanica priamo riadi počet užívateľov. Brány sú pripojené k sieti rovnako, ako opakovače. Takže, s rastúcim počtom brán v prístupovej PLC sieti sa znižuje kapacita siete a náklady rastú. Ak opakovače poskytujú iba jednoduchý signál odosielaného medzi segmentami siete, brána môže ponúknuť inteligentnejšie rozdelenie dostupných sieťových prostriedkov a zabezpečiť lepšiu účinnosť siete. [2]

### 3 Parametre vedenia

Základné parametre vedenia odrážajú súvis medzi napätím a prúdom. Medzi tieto primárne parametre patria (základné parametre):

- Rezistencia (merný odpor)  $R$
- Indukčnosť (reaktancia)  $L$
- Kapacita  $C$
- Zvod (konduktancia)  $G$

Medzi sekundárne parametre vedenia spadajú:

- Charakteristická impedancia  $Z_c$
- Merná miera prenosu  $\gamma$

V sústavách so striedavým prúdom o frekvencii 50 Hz sa zavádzajú odvodené parametre :

- Induktívna reaktancia

$$X = 2\pi fL. \quad (3.1)$$

- Kapacitná susceptancia

$$B = 2\pi fC. \quad (3.2)$$

- Pozdĺžna impedancia

$$Z = R + jX. \quad (3.3)$$

- Priečna admitancia (u vedeniach)

$$Y = G + jB. \quad (3.4)$$

- Priečna admitancia (u transformátoroch)

$$Y = G - jB_t. \quad (3.5)$$

Prenosové vedenia slúžiace na zdieľovacie účely sú typ súmerných štvorpólov s priestorovo rozprestrenými parametrami. Slúžia k prenosu elektrických signálov, ktoré nosia informácie na relatívne veľké vzdialenosti. Dĺžka vodičov je vo vedeniach omnoho väčšia ako priečna vzdialenosť medzi nimi. Táto skutočnosť zjednodušuje riešenie pomerov na vedeniach. Vo všeobecnom prípade je riešenie zložité. Keďže u káblových vedeniach je vzdialenosť medzi vodičmi malá, javy sú vlnového charakteru v pozdĺžnom smere. Napätie a prúd na vedení (sú funkciou času a jednej priestorovej súradnice) postačí k jeho popisu vedenia. Ak sa nemenia prierezy vodičov, usporiadanie a vlastnosti prostredia, kde sa vedenie

nachádza, vedenie označujeme ako homogénne. V homogénnom vedení majú rovnako dlhé úseky vedenia zhodné elektrické vlastnosti. [4]

### 3.1 Parametre vonkajších vedení

Tieto parametre sa vyjadrujú v jednotkách na 1 km dĺžky.

Pozdĺžna impedancia vedenia:

$$z_k = R_k + jX_k. \quad (3.6)$$

Priečna admitancia vedenia:

$$y_k = G_k + j.B_k, \quad (3.7)$$

kde  $R_k$  je rezistancia vedenia na jednotku dĺžky,  $X_k$  je induktívna reaktancia vedenia na jednotku dĺžky,  $G_k$  je konduktancia vedenia na jednotku dĺžky,  $B_k$  je kapacitná susceptancia vedenia na jednotku dĺžky.

Parametre vonkajších vedení závisia od materiálu, konštrukcii, izolácií a usporiadania vodičov. Na výrobu vodičov vedenia sa používajú materiály hliník, meď prípadne oceľ alebo bronz (vo výnimočných prípadoch). Drôty alebo laná sú používané ako vodiče vedenia. [5]

### 3.2 Rezistancia vedenia (merný odpor)

Pomocou rezistivity, menovitého prierezu a dĺžky vedenia sa určuje rezistancia vodičov pri elektromagnetických výpočtoch. Ďalšie činitele, ktoré majú vplyv na rezistanciu vodiča sú teplota, krútenie drôtov v lanách, priehyb zavesených vodičov, nerovnomernosť prierezu, spoje vodičov, odchýlky od menovitého prierezu a pri striedavom prúde skinefekt. Vplyv materiálu na rezistanciu je vyjadrený rezistivitou. Pri ustálenom jednosmernom prúde a ustálenej teplote vodiča je jeho rezistancia:

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{s}, \quad (3.8)$$

kde  $\rho_0$  je rezistivita pri teplote  $\vartheta_0$ ,  $l$  je dĺžka vodiča,  $s$  je plocha prierezu.

Vplyv rozdielnej teploty na rezistanciu oproti teplote  $\vartheta_0$  je podľa vzťahu:

$$k_{\vartheta} = \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta_0}} = 1 + \alpha_R (\vartheta - \vartheta_0) + \beta_R (\vartheta - \vartheta_0)^2, \quad (3.9)$$

kde  $R_{\vartheta}$ ,  $R_{\vartheta_0}$  sú rezistencie pri teplote  $\vartheta$  a  $\vartheta_0$ ,  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$  sú teplotné súčinitele odporu.

Keďže  $\beta_R \ll \alpha_R$ , preto stačí v rozsahu teplôt vodičov pri ustálenom prevádzkovom stave brať do úvahy len lineárnu závislosť rezistencie na teplote (asi do 80 °C).



Skinefekt spôsobuje zväčšovanie prúdovej hustoty v smere k povrchu vodiča pri priechode striedavého prúdu. Závisí na frekvencii prúdu, materiáli, veľkosti a tvare prierezu vodiča a pôsobí zväčšením rezistancie proti rezistancii pre jednosmerný prúd. [5]

Pre káblové modely vedenia pre xDSL systémy, ktoré pracujú pre frekvenciu až do desiatok MHz, sa merný odpor  $R$  symetrických káblových vedení dá vyjadriť vzťahom:

$$R = R_0 k_f = R_0 (k_s k_b k_0), \quad (3.10)$$

kde je  $R_0$  jednosmerný odpor vedenia udávaný v  $\Omega/\text{km}$ ,  $k_s$  je činiteľ zväčšenia odporu vplyvom povrchového javu tzv. skin-effect,  $k_b$  je činiteľ zväčšenia odporu vplyvom blízkosti vodičov,  $k_0$  je činiteľ zväčšenia odporu vplyvom okolitých vodičov (tienenie, plášťom apod.). Podľa zmeny kritickej frekvencie  $f_k$  sa menia vzťahy pre výpočet činiteľa  $k_s$  (kritická frekvencia závisí na priemere vodiča).

Pre nadkritickú frekvenciu platí:

$$k_s = 0,12d\sqrt{f} + 0,25, \quad (3.11)$$

kde  $d$  je priemer vodiča,  $f$  je frekvencia [kHz].

Pre frekvenciu nižšiu ako kritickú platí [4]:

$$k_s = 1,25\left(\frac{f}{f_k}\right)^2. \quad (3.12)$$

### 3.3 Indukčnosť vedenia

Vplyv magnetického poľa od prúdu vo vodičoch na daný vodič charakterizuje indukčnosť. Vo vedeniach, ktoré sú viacvodičové, sa vytvárajú vzájomné magneticky viazané prúdové obvody jednotlivých vodičov. Indukcia napätia sa prejavuje nielen v jednom vodiči, ktorý je pod vplyvom časového premenného magnetického poľa od prúdu, ale aj v ostatných vodičoch. Ak trojfázové symetrické vedenie má súmernú záťaž, tak súhrn indukčných vplyvov sa môže charakterizovať indukčnosťou a prúdom jednej fázy. Ak to nie je splnené (vedenie je nesúmerné, vedenie má nesúmernú záťaž alebo kombinácia týchto prípadov), tak indukčné vplyvy sa vyjadrujú oddelene pomocou vlastnej a vzájomnej indukčnosti a prúdov v príslušných obvodoch. [5]

Pre indukčnosť dvojvodičového vedenia platí vzťah:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_{rv} l_2}{2\pi} \cdot \ln \frac{d}{r} + \frac{\mu_0 \mu_r l_2}{8\pi}, \quad (3.13)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vákua,  $\mu_{rv}$  je relatívna permeabilita,  $l_1$  je dĺžka vodiča,  $d$  je osová vzdialenosť vodičov,  $r$  je polomer vodiča,  $\mu_r$  je permeabilita.

Indukčnosť vedenia sa obvykle udáva v mH/km, tak dosadíme do rovnice (3.13)  $l_1 = 1000$  m, permeabilitu vákua  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  H/m, relatívnu permeabilitu pre vonkajší magnetický obvod  $\mu_{rv} = 1$ , a prevedieme prirodzený logaritmus na dekadický. Potom:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,05\mu_r, \quad (3.14)$$

kde  $\mu_r$  je relatívna permeabilita materiálu vodiča,  $d$  je osová vzdialenosť,  $r$  je polomer vodiča.

Druhý člen predstavuje zložku indukčnosti od magnetického toku vo vnútri vodiča, ktorá je nezávislá na polomere i vzdialenosti vodičov.

Výrazy (3.15), (3.16), (3.17) pre indukčnosť vodičov trojfázového nesúmerného vedenia zahrňuje indukčný vplyv magnetického poľa pôsobiaceho prúdom vo vodiči i od polí dvoch susedných vodičov pre prípad vyváženej sústavy prúdov – predstavujú prevádzkové indukčnosti.

$$L_{p1} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{12}d_{13}}}{r} + 0,05\mu_r, \quad (3.15)$$

$$L_{p2} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{12}d_{23}}}{r} + 0,05\mu_r, \quad (3.16)$$

$$L_{p3} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{13}d_{23}}}{r} + 0,05\mu_r, \quad (3.17)$$

kde  $d_{12}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{23}$  sú osová vzdialenosť vodičov,  $r$  je polomer vodiča,  $\mu_r$  je permeabilita. [5]

V prípade súmerného usporiadania vodičov ( $d_{12} = d_{13} = d_{23} = d$ ) sú prevádzkové indukčnosti všetkých troch vodičov rovnaké. Platí pre nich vzťah ako pre indukčnosť dvojvodičového vedenia:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,05\mu_r \quad (3.18)$$

Merná indukčnosť  $L$  (pre modely, ktoré pracujú až do desiatok MHz) je daná vzťahom:

$$L = 0,4 \cdot \ln \frac{2a}{d} + 0,25, \quad (3.19)$$

kde  $a$  je vzdialenosť vodičov,  $d$  je priemer vodičov.

V tomto prípade neberieme do úvahy frekvenčnú závislosť indukčnosti. [4]

### 3.4 Konduktancia vedenia (merný zvod)

Konduktancia  $G_k$  je reálna zložka priečnej admitancie. Táto zložka spôsobuje straty činného výkonu a tie príliš závisia na napätí a poveternostných podmienok. Zaťaženie má malý vplyv na straty činného výkonu. Straty sa delia na straty zvodom cez izolátory a straty korónou (tie prevládajú a uplatňujú sa až od menovitého napätia vedenia 110 kV). Určenie zvodovej konduktancie je veľmi zložitá. Ovplyvňuje ju často množstvo javov, ktoré sa často

vyskytujú náhodne. Zvyčajne sa vypočítava na základe zmeraných strát naprázdno. Tie sú približne rovnaké ako straty prevádzkové v priečnej admitancii. Pri pozdĺžnej impedancii pri chode naprázdno, preteká malý prúd a vplyv úbytku napätí a strát v rezistanciách vodičov sa zanedbáva. [5]

Merný zvod sa skladá z dvoch zložiek:

$$G(\omega) = G_0 + k_g \omega C_p, \quad (3.20)$$

kde  $G_0$  je zvod pri jednosmernom napätí medzi vodičmi,  $k_g$  je koeficient striedavého prúdu,  $C_p$  je provozná kapacita.

Druhá zložka zvodu je frekvenčne závislá a je daná v pomere k „vodivosti prevádzkovej kapacity“. Hodnota zvodu v káblových vedeniach je veľmi malá a z reálneho pohľadu prakticky nulová, a preto vo väčšine prípadoch sa o nej neuvažuje. [4]

### 3.5 Kapacita vedenia (merná kapacita)

Vplyvom elektrického poľa, ktoré pôsobí v priestore vedenia napätím, medzi vodičmi na dané vedenie, je charakterizovaná kapacita vedenia. Časovo premenné elektrické pole, narozdiel od napätia vo vodiči indukuje prúdy nie iba v tomto vodiči, ale aj v ostatných vodičoch. Prúdový obvod, ktorý vznikne pri jednovodičovom vedení sa dá z pohľadu kapacity nahradiť fiktívnym obvodom. V tomto obvode je druhá elektróda (zem) nahradená vodičom umiestneným pod skutočným vodičom, v zemi v hĺbke, ktorá je rovnaká ako výška vodiča nad terénom. Táto náhrada nie je závislá na frekvencii a materiálových konštantách zeme a vodiča – metóda zrkadlenia. [5]

Pre kapacitu trojfázového vedenia platí:

$$C_p \cong \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}}}{r}}, \quad (3.21)$$

kde  $\epsilon_r$  je relatívna permitivita,  $\epsilon_0$  je permitivita materiálu vodiča,  $d_{12}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{23}$  sú osové vzdialenosti vodičov,  $r$  je polomer vodiča.

Prevádzková kapacita trojvodičového vedenia so zemným lanom je rovnaká ako pri trojvodičovom vedení bez zemného lana, ak platí, že sú fázové vodiče u oboch vedeniach rovnaké. Pri použití zemného lana sa kapacita vodičov oproti zemi zväčšuje a vzájomná kapacita sa znižuje.

Pre kapacitu jednofázového vedenia (dvojvodičového, súmerného) platí:

$$C_p \cong \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\frac{\sqrt[3]{d}}{r}}, \quad (3.22)$$

kde  $\epsilon_r$  je relatívna permitivita,  $\epsilon_0$  je permitivita materiálu vodiča,  $d$  je osová vzdialenosť vodičov,  $r$  je polomer vodiča. [5]

Merná kapacita  $C$  káblových párov sa dá vyjadriť vzt'ahom:

$$C_p \cong \frac{28\epsilon_r}{\ln p \frac{a}{r}}, \quad (3.23)$$

kde  $\epsilon_r$  je pomerná dielektrická konštanta,  $p$  je činiteľ typu prvku vedenia,  $a$  je vzdialenosť vodičov,  $d$  je priemer vodiča.

Závislosť kapacity na frekvencii sa v tomto prípade neuvažuje. [4]

### 3.6 Merná miera prenosu

Merný činiteľ prenosu je komplexná veličina  $\gamma$ , ktorá sa taktiež nazýva činiteľ šírenia a jeho reálna časť  $\alpha$  tvorí merný útlm, a imaginárna časť  $\beta$  merný fázový posuv, platí teda:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (3.24)$$

kde  $R$  je rezistencia,  $\omega$  je uhlová rýchlosť,  $L$  je indukčnosť,  $G$  je konduktancia,  $C$  je kapacita.

Merný útlm  $\alpha$  vychádza v jednotkách  $\text{km}^{-1}$ , merný fázový posuv  $\beta$  jednotkách  $\text{rad/km}$ . [4]

### 3.7 Charakteristická impedancia

Charakteristická impedancia vedenia je prevrátená hodnota admitancie. Je definovaná primárnymi parametrami:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (3.25)$$

kde  $R$  je rezistencia,  $\omega$  je uhlová rýchlosť,  $L$  je indukčnosť,  $G$  je konduktancia,  $C$  je kapacita.

[4]

## 4 Praktická časť

Cieľom tejto praktickej časti je zoznámenie sa s technológiou PLC a vytvorenie širokopásmovej siete a úzkopásmovej siete. V rámci týchto meraní bolo zobrazené spektrum osciloskopmi oboch sietí. V širokopásmovej sieti boli namerané rýchlosti na fyzickej a aplikačnej vrstve. Na úzkopásmovej sieti bolo namerané spektrum rušenia vŕtačkou.

### 4.1 Príprava merania širokopásmovej siete

Vytvorená PLC sieť je postavená na báze čipu z rodiny DS2 (systémy používajúce moduláciu OFDM) a umožňuje vybudovať sieťovú štruktúru „distribuovaný most“. Zariadenia, z ktorých sa táto PLC sieť skladá, sú troch druhov:

- Head-end (HE) – zariadenie spája PLC prístupovú sieť na nízkonapäťových elektrických rozvodoch s WAN. Ethernetovú prípojku prevedie na elektrickú sieť.
- Repeater (RE) – pomocou tohto zariadenia je možné opakovať (zosilniť) vŕ signál. Je možné použiť časové zdieľanie pásma, frekvenčné zdieľanie pásma (na rôznych frekvenciách prebieha príjem a vysielanie), alebo ich kombinácie.
- Customer Premises Equipment (CPE) – modem pre koncových užívateľov. Zariadenie pre spätný prevod vŕ modulácie na ethernetové rozhranie.

Pomocou týchto zariadení bola zostavená PLC sieť s koreňovým HE modemom, prípadne medzil'ahľým REP a koncovým CPE modemom. Podľa typu HE môže rozsah siete nadobúdať desiatky až stovky metrov. [6]

### 4.2 Zariadenia v širokopásmovej sieti

#### 4.2.1 AMH-200

AMH-200 je koncový užívateľský modem. Umožňuje spätný prevod vysokofrekvenčného signálu z elektrickej siete na Ethernet rozhranie (1 x RJ45, 100Mbit Ethernet). DSS9011 je prvok pre výrobu indoor modulov slúžiacich ako prvky peer-to-peer domácich sietí, je optimalizovaný pre prenos audio a signál od VoIP po multikanálový DVD hi-fi signál (AMH-

200). AMH-200 je koncové CPE zariadenie. Modulácia zariadenia je OFDM s vysokou hustotou nosných frekvencií (pásmo 3-34 MHz) a dátový tok až 200 Mbps. [9]

#### 4.2.2 AMH-201F

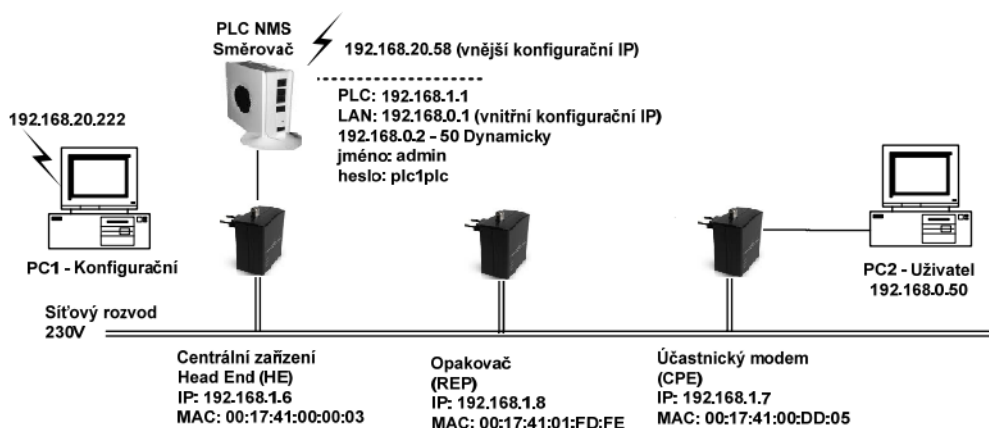
Zariadenie prepojuje siete WAN s PLC prístupovou sieťou na nízkych elektrických rozvodoch. Umiestnené je v trafostanici vn/nn alebo v rozvodnej skrini vo vnútri objektu. AMH-201F plní funkciu HE, CPE a REP. Konektivita (optika, wireles, satelit) je privedená k miestu injektáže a Head-End prevádza tento signál na elektrickú sieť. Dosah PLC signálu je zhruba 400 m. Modulácia zariadenia je OFDM s vysokou hustotou nosných frekvencií (pásmo 3-34 MHz) a dátový tok je až 200 Mbps. [7]

#### 4.2.3 AGW-200

Slúži pre správu siete Defidev. Toto zariadenie je neoddeliteľnou súčasťou PLC siete Defidev. Prepojením prenosového počítača s AGW-200, cez HE zapojeným do siete, je umožnená priama konfigurácia Defidev siete. Je neoddeliteľnou súčasťou i vo variante koaxiálnej siete. Plní funkciu AP (prístupový bod). [8]

### 4.3 Nastavenie konfigurácie

Pomocou programu Network Management System (NMS) sme nakonfigurovali sieť, ktorá je na obr. 4.1. Konfiguráciu zariadení je zobrazené na obr. 4.2.



Obr. 4.1: Schéma širokopásmovej siete. [6]

**Default**  
WAN: DHCP  
LAN: 192.168.0.1 / 255.255.255.0  
PLC: 192.168.1.1 / 255.255.255.0  

DOWNLOAD

RENAME

☐ 5 | 14 - 34 MHz  
☒ 6 | 4 - 34 MHz  
☐ 7 | 2 - 8 MHz & 19 - 32 MHz (fast)

a)

b)

Type of node	HE
MAC address	00:17:41:01:FD:FD
IP address	192.168.1.6

c)

Obr. 4.2: Nastavenie NMS: a)nastavenie IP adresy LAN a PLC na smerovači, b)nastavenie frekvenčného pásma, c) nastavenie IP adresy zariadenia HE.

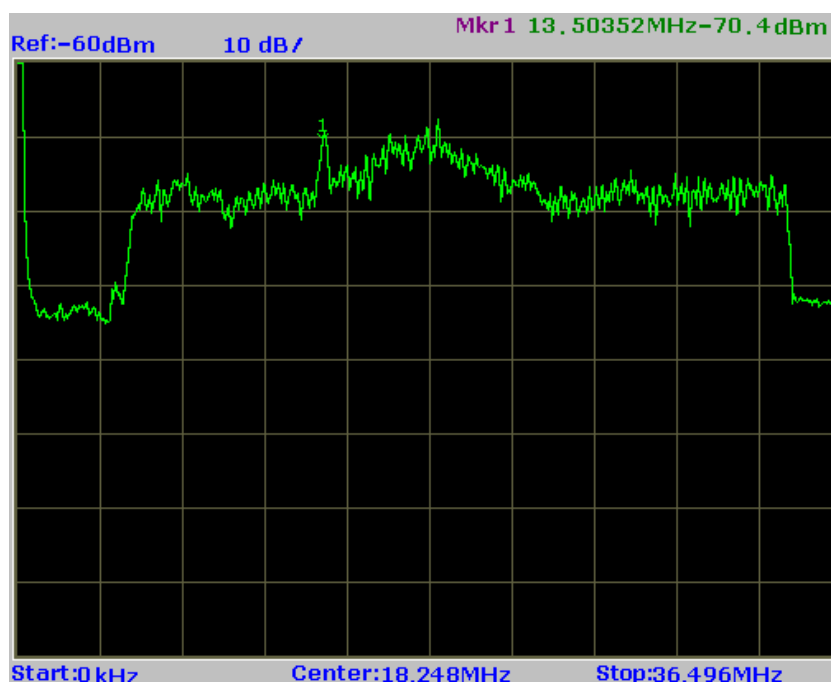
## 4.4 Spektrá signálu v širokopásmovej sieti

Na meranie spektier signálu bol použitý osciloskop GSP-830 od firmy GW INSTEK a diferenčná sonda. Diferenčná sonda bola pripojená do elektrickej rozdvojky, tá bola pripojená do elektrickej zásuvky, kde boli zapojené aj HE, REP a CPE, a na osciloskop.

Meranie bolo prevedené pre frekvenčné pásmo 4 až 34 MHz. Na obr. 4.3 je zobrazené spektrum, kde nebol vykonávaný prenos súboru ani sťahovanie dát z internetu. Toto spektrum je vytvárané komunikáciou medzi jednotlivými zariadeniami (HE, REP, CPE, AP). Nosná toho signálu je na 13,5 MHz. Úroveň signálu na nosnej signálu je hodnota -72 dBm. Na ďalšom obrázku 4.4 je zobrazené spektrum pri sťahovaní súboru z internetovej stránky (<http://www.ubuntu.cz/stahnout>). V tomto spektre je vidieť zvýšenie úrovne signálu. Konkrétne nosná sa zvýšila o 1,6 dBm, teda na hodnotu -70,4 dBm.



Obr. 4.3: Úroveň signálu bez sťahovania súboru.



Obr. 4.4: Úroveň signálu pri sťahovaní súboru z internetu.



## 4.5 Meranie rýchlostí v širokopásmovej sieti

Prenosové rýchlosti, ktoré boli namerané na fyzickej a aplikačnej vrstve pri sťahovaní súboru a bez sťahovania súboru sú zobrazené v tab. 4.1 a tab. 4.2. Všetky zariadenia boli zapojené v jednej zásuvke.

SNR krivky boli taktiež namerané pri sťahovaní a bez sťahovania súboru. Na týchto krivkách nie je viditeľný rozdiel týchto kriviek, takže v tomto prípade sťahovanie súboru nemalo vplyv na SNR krivky zariadení. Odstup signál-šum klesá so zväčšujúcou sa frekvenciou.

Meranie prenosových rýchlostí bolo prevedené aj mimo spoločnej zásuvky. Pri meraní sa vyskytli problémy navedenia spojenia medzi jednotlivými zariadeniami aj v zásuvkách na treťom poschodí. Na obr. 4.6 je zakreslené, ako boli jednotlivé zariadenia zapojené počas meraní. Meranie prebiehalo na treťom poschodí. Na ďalších poschodiach sa nepodarilo zmerať žiadne hodnoty, pretože notebook nedokázal naviazať spojenie. Je to pravdepodobne preto, že jednotlivé poschodia sú na rozličných fázach. Aby zariadenia medzi sebou naviázali spojenie musia byť na rovnakej fáze. Z tabuliek je možné vyčítať, že rýchlosť na fyzickej ale aj aplikačnej vrstve klesá s narastajúcou dĺžkou vedenia.

**Tab. 4.1: Prenosové rýchlosti zariadení CPE, HE, REP namerané v spoločnej zásuvke na fyzickej vrstve.**

Vrstva	Zariadenie	Download [Mbit/s]	Upload [Mbit/s]
Fyzická	CPE	184	184
	HE	132	159
	REP	159	132

**Tab. 4.2: Prenosová rýchlosť na aplikačnej vrstve. Pri tomto meraní boli zariadenia v jednej zásuvke.**

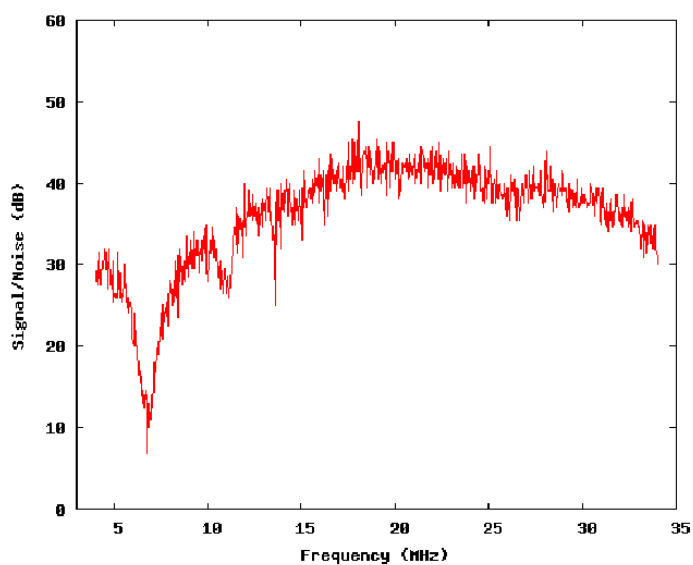
Vrstva	Download [MB/s]	Upload [Mbit/s]	Priemerná rýchlosť [Mbit/s]
Aplikačná	1,032	2,242	8,252

**Tab. 4.3: Meranie prenosových rýchlostí na 3 poschodí na fyzickej vrstve.**

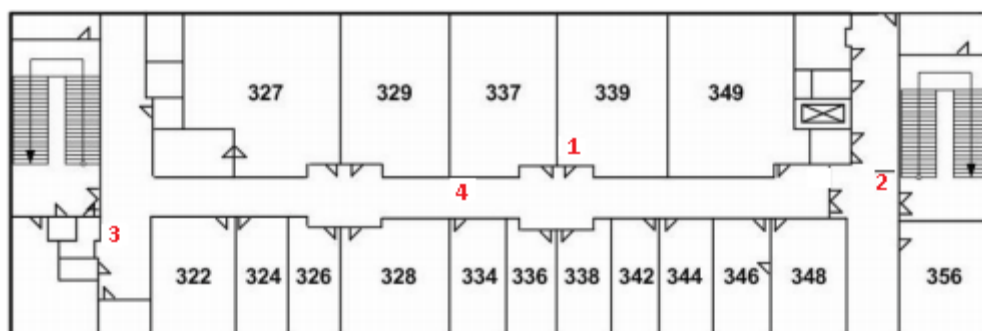
Zásuvka	Download [Mbit/s]	Upload [Mbit/s]
1	115	162
2	39	31
3	35	31
4	40	35

**Tab. 4.4: Meranie prenosových rýchlostí na 3 poschodí na aplikačnej vrstve.**

Zásuvka	Download [MB/s]	Upload [Mbit/s]	Priemerná rýchlosť [Mbit/s]
1	1,727	-	13,81
2	0,941	-	7,53
3	0,992	-	7,994
4	0,901	-	7,207



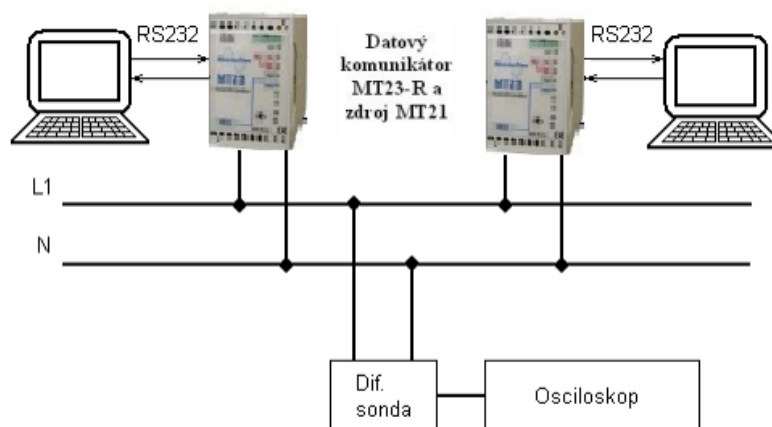
**Obr. 4.5: Krivka SNR pre zariadenie He.**



Obr. 4.6: Zapojenie CPE zariadenia na 3. poschodí. REP zariadenie bolo zapojené v zásuvke 1. [6]

## 4.6 Príprava merania úzkopásmovej siete

Podľa schémy, ktorá je na obr. 4.7 bola zostavená úzkopásmová sieť. Na tejto sieti bolo osciloskopom zobrazené spektrum signálu počas prenosu súboru. Po pripojení rušivého zdroja do siete (ručná vŕtačka), bolo opäť zobrazené spektrum na osciloskope. Komunikácia bola meraná modemami MT23-R od firmy ModemTec. Napájací modul tohto modemu je MT21.

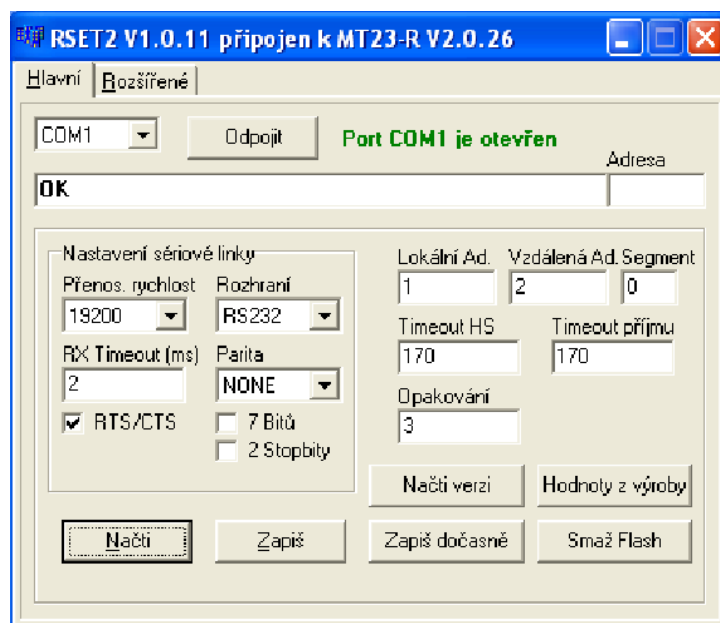


Obr. 4.7: Schéma zapojenia úzkopásmovej siete.

## 4.7 Konfigurácia modemov

Pred zahájením merania je potrebné nakonfigurovať oba modemy. Tieto modemy boli nakonfigurované v programe RSET. Po pripojení špeciálneho kábla k modemu a spustenia programu RSET, pomocou tlačidla „Pripojiť“, bola možná konfigurácia modemov. Boli nastavené tieto parametre: port, prenosová rýchlosť, rozhranie, parita, lokálna a vzdialená

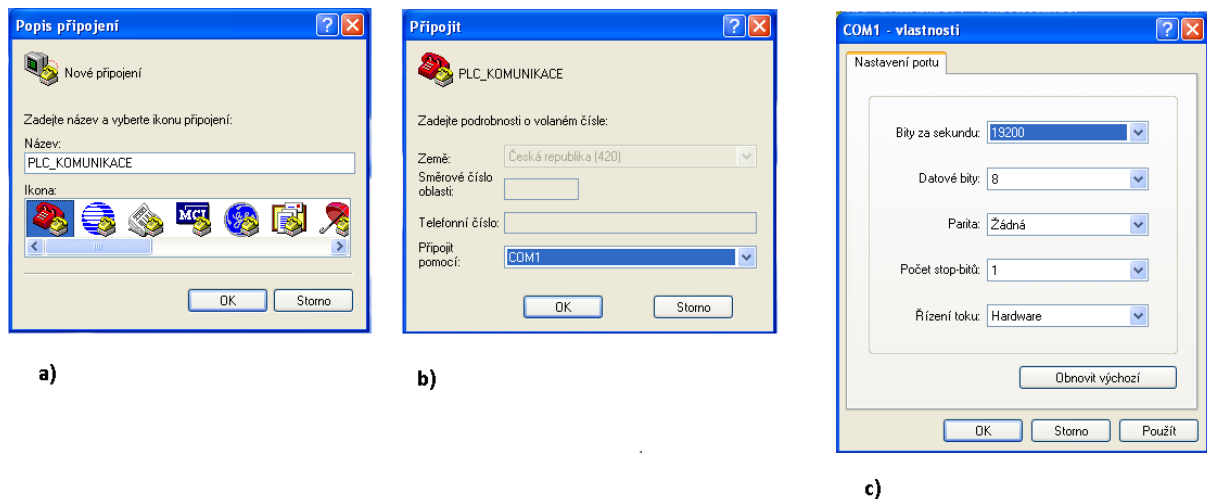
adresa. Po nastavení těchto parametrov, boli tlačidlom „Zapiš“ uložené parametre do modemu. Rozdiel v nastavení modemov bolo v parametroch lokálna adresa a vzdialená adresa. Jeden počítač mal lokálnu adresu nastavenú na hodnotu 1 a vzdialenú adresu na hodnotu 2 a druhý počítač bol nakonfigurovaný ako lokálna adresa 2 a vzdialená 1. Nastavenie konfigurácie modemu (jeho parametre) pomocou programu RSET je na obr. 4.8.



Obr. 4.8: Nastavenie konfigurácie modemu pomocou programu RSET.

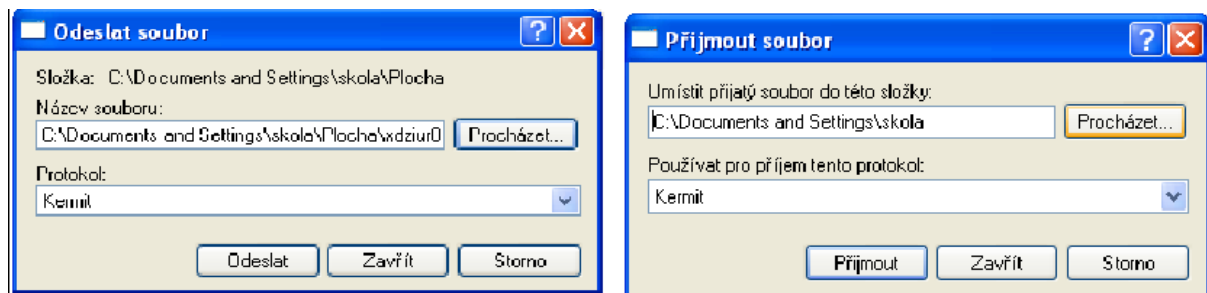
## 4.8 Nastavenie komunikácie

Po nakonfigurovaní modemov a prepojení s počítačmi je možné nastavenie komunikácie. Komunikácia medzi modemami bola nastavená v programe Hyperterminál, ktorý je štandardnou súčasťou operačného systému Windows. Na obr. 4.9 je zobrazené nastavenie Hyperterminálu, vytvorenie názvu pripojenia „PLC\_KOMUNIKACE“. Následne je zvolený port pripojenia a nakoniec nastavené parametre prenosová rýchlosť, dátové bity, parita, počet stop-bitov a riadenie toku. Tieto parametre nastavené v programe Hyperterminál musia byť zhodné s parametrami, ktoré sú nastavené v modemoch.

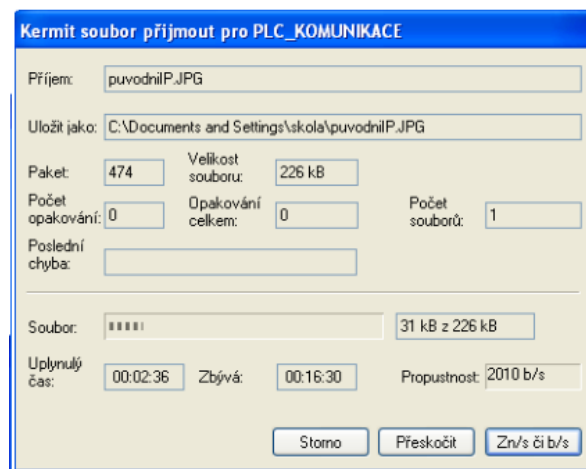


**Obr. 4.9: Nastavenie Hyperterminálu: a) vytvorenie názvu pripojenia, b) zvolenie portu, c) nastavenie parametrov programu.**

Ak tieto parametre sú nastavené na oboch počítačoch v programe Hyperterminál, na spustenie komunikácie je potrebné v Hyperterminále na jednom počítači v menu „Přenos“ zvolit’ odoslanie súboru. Na druhom počítači vybrať v menu „Přenos“, prijať súbor.



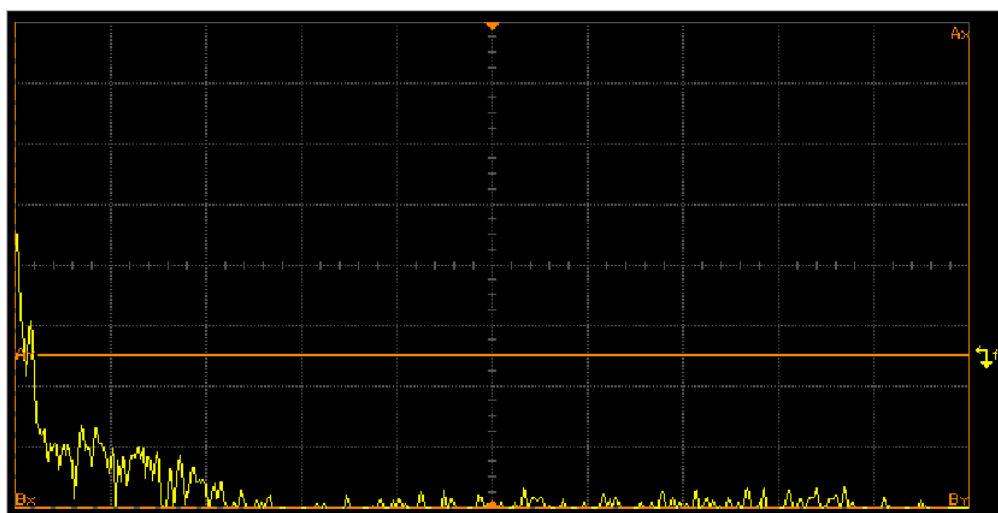
**Obr. 4.10: Odosielanie a príjem súboru.**



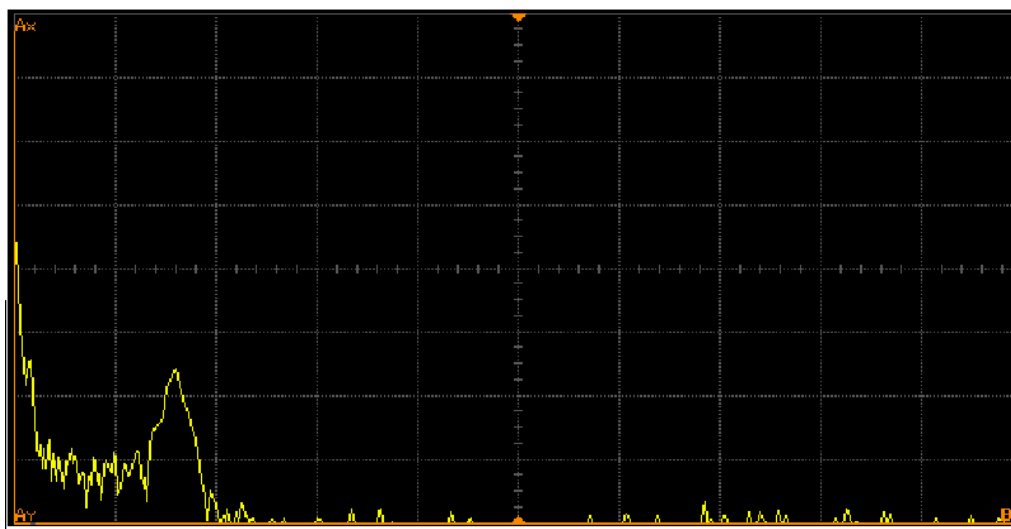
**Obr. 4.11: Prenos súboru.**

## 4.9 Zobrazenie spektier v úzkopásmovej sieti

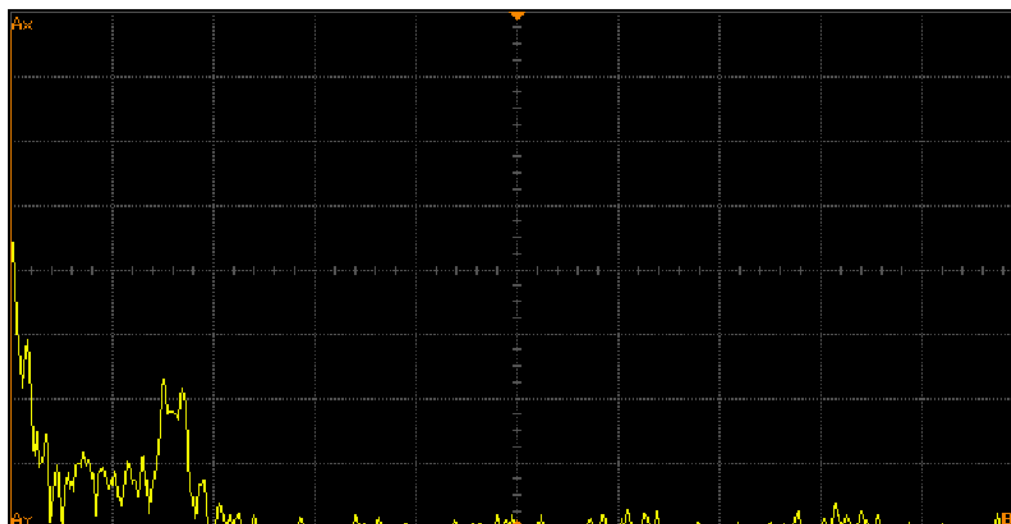
K danej schéme merania bol pripojený osciloskop cez diferenčnú sondu, ktorá bola zapojená v spoločnej zásuvke s modemami. Ako prvé spektrum bolo namerané spektrum bez prenosu súboru v sieti, vid'. obr. 4.12. Pri zobrazení spektra s prenosom súboru v sieti pri prvom pokuse, bolo pravdepodobne v nej veľa rušenia. V spektre nie je možné rozlíšiť jednotlivé nosné z dôvodu mnohých rušivých vplyvov v sieti, vid'. obr. 4.13. Po opakovanom nameraní tohto spektra, sú viditeľné jednotlivé nosné v tomto signále. V okolí frekvencie 80 kHz je vidieť nárast úrovne signálu. Na frekvenciách 75 kHz a 85 kHz je zobrazená komunikácia dvoch modemov pri prenose súboru, vid'. obr. 4.14. Pri prvom meraní nie je zrejmé na akých frekvenciách prebieha táto komunikácia medzi modemami.



Obr. 4.12: Spektrum signálu bez prenášania súboru.

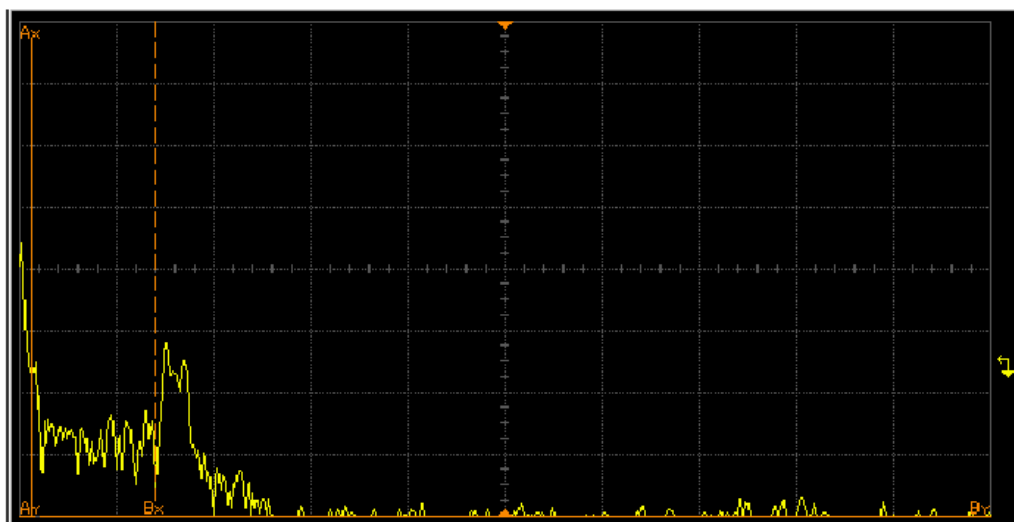


Obr. 4.13: Úroveň signálu pri prenose súboru. Nie je vidieť nosné signálu pri komunikácii modemov.



Obr. 4.14: Úroveň signálu pri prenose súboru. Nosné signály sú v okolí frekvencie 80 kHz.

Do zásuvky, v ktorej boli zapojené modemy a diferenčná sonda, bola zapojená rýchlovarná konvica. Podľa predpokladov rušenie nebolo zaznamenané. Namiesto konvice bola pripojená ručná vŕtačka s príkonom 450 W. Zobrazenie tohto spektra je na obr. 4.15. Zvýšenie spektra v okolí 6-150 kHz je spôsobené rušením vŕtačky. Do tejto frekvencie spadajú aj frekvencie 75 kHz a 85 kHz, teda frekvencie na ktorých modemy komunikujú.



Obr. 4.15: Úroveň signálu pri rušení. Vidieť nárast úrovne signálu na kitočtoch 6-150 kHz.

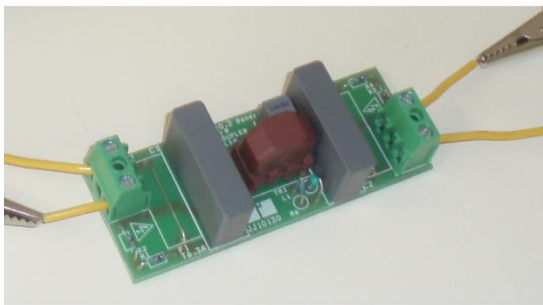
## 5 Vázbové členy

Vázbový člen slúži k privedeniu vysokofrekvenčnej modulácie signálu zo zariadenia HE (Head-End) alebo zariadenia REP (Repeater) na elektrickú sieť. Tento člen pracuje na dvoch fyzikálnych princípoch:

- Induktívny – delený feromagnetickým prípadne železitý rozpojený krúžok slúži ako vysokofrekvenčný transformátor. Vázbové členy sú spojené a injektujú sa na niektorú z fáz v elektrickej rozvodni. Ak nastane situácia, že fázy vedú blízko vedľa seba aspoň dva metre, signál sa zopakuje na všetky fázy. Z hľadiska použitia sa tieto členy najviac používajú pre pripojenie na nízkonapäťový rozvod.
- Kapacitný (malý väzbový vysokonapäťový vysokofrekvenčný kondenzátor) [10]

### 5.1 Kapacitný väzbový člen MCB10.2

Tento väzbový člen umožňuje signálové prepojenie dvoch vedení, ktoré sú oddelené pre komunikačný signál siete LonWorks v pásme C. LonWorks je technológiou, ktorá je riadiacim sieťovým systémom. Sieť je zostavená z inteligentných zariadení prípadne z uzlov. Tie riadia svoje okolité prostredie a komunikujú s ostatnými uzlami v sieti. [11] Väzbový člen MCB10.2, ktorý bol vyrobený firmou ADT s.r.o., bol použitý pri meraniach impedancie a zisťovaní jeho vplyvu na prenosovú funkciu vedenia.



Obr. 5.1: Väzbový člen MCB10.2.

### 5.2 Induktívny väzbový člen ICU-438

Toto magnetické jadro slúži k injektáži PLC signálu na elektrickú sieť indukčnou metódou. Cievka inštalovaná na jednu elektrickú fázu funguje ako väzbový transformátor s primárnym okruhom vychádzajúceho z HE a sekundárnym okruhom je elektrická sieť. [12]



Aj tento člen bol využitý pri meraní impedancie a taktiež použitý pri zisťovaní vplyvu na prenosovú funkciu vedenia.

Tab. 5.1: Základné parametre väzbového člena ICU-438 podľa [12].

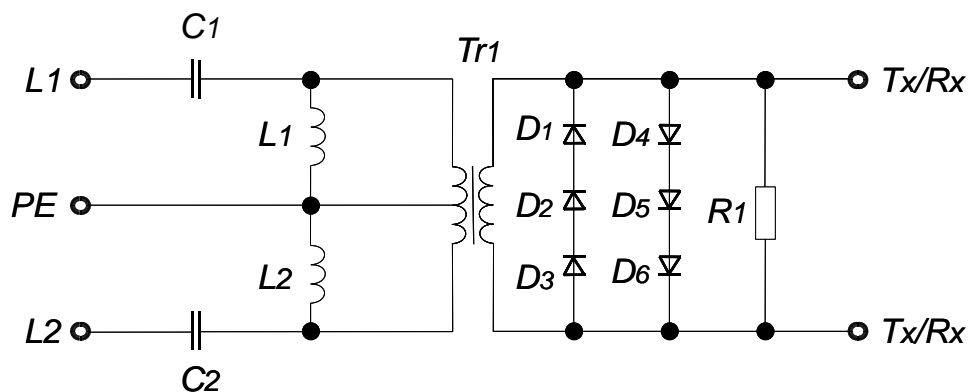
Parametre	Hodnoty
Vonkajší priemer	48mm
Vnútorňý priemer	cca 22-24mm
Výška	18,92mm
Maximálny prúd	400A
Hmotnosť	131g



Obr. 5.2: Vázbový člen ICU-438.

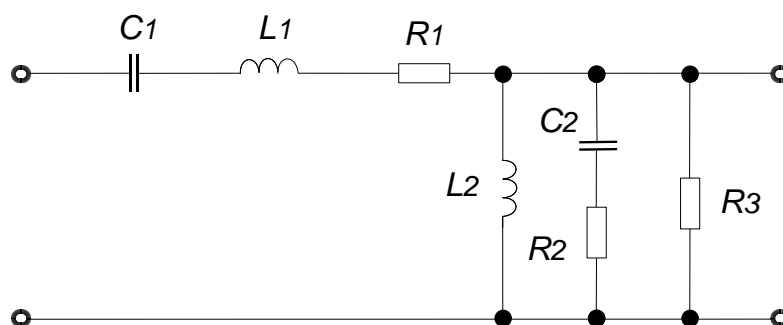
### 5.3 Model väzbového člena

Prípadné zapojenie väzbového člena podľa obr. 5.3, zabezpečuje väzbu modemu PLC na silnoprúdovom vedení. Ide o kapacitný väzbový člen s oddeľovacím transformátorom.



Obr. 5.3: Schéma väzbového člena. [13]

Podstatnou časťou PLC kanálu je z hľadiska prenosu väzbový člen. Tento prvok silnoprúdovej siete má dôležitú vlastnosť a tou je, že sa jeho vlastnosti dajú prispôbovať vhodným obvodovým riešeniam. Tento člen zapríčiňuje ďalší útlm. Zároveň prispieva k celkovému útlmu, ktorý sa javí byť pri dátových prenosoch technológií PLC ako veľmi významný. Model väzbového člena je predstavený v [13]. Parametre na základe merania sú určené na základe merania. Obr. 5.4 ukazuje tento model a jeho použitie je smerované do pásma 100 kHz ÷ 30 MHz. [13]



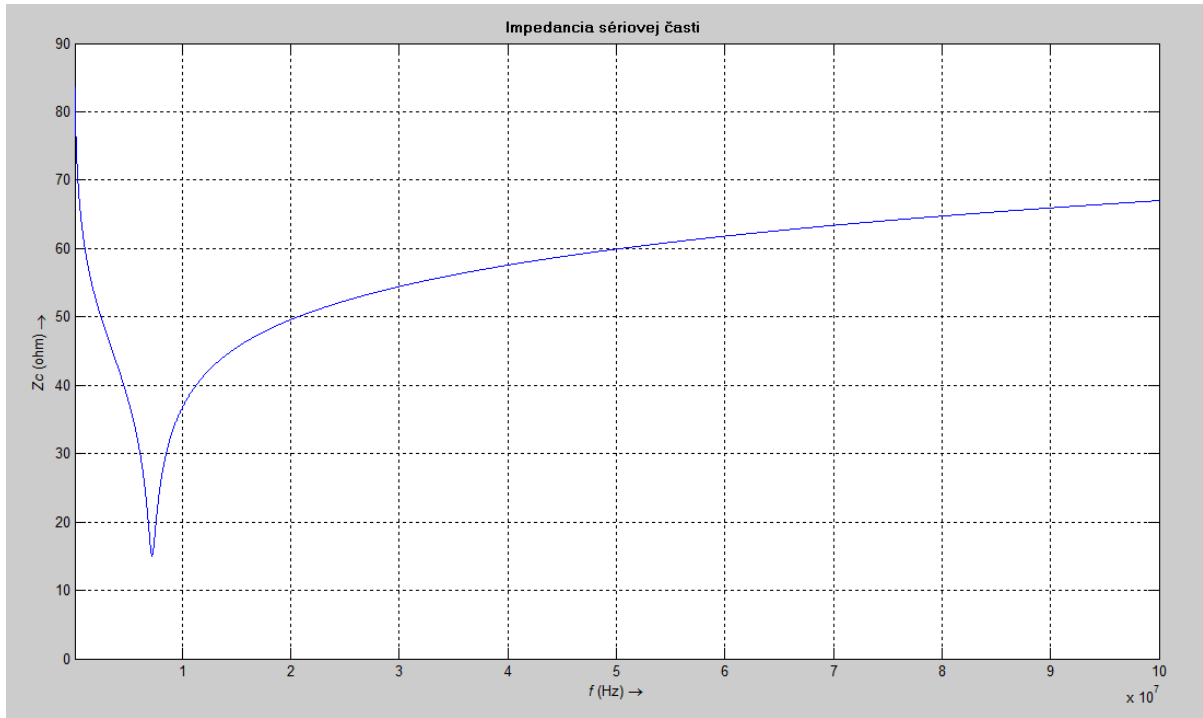
Obr. 5.4: Model väzbového člena. [13]

Hodnoty prvkov sú  $C_1 = 374$  pF (kapacita väzbového člena),  $L_1 = 1,3$   $\mu$ H (rozptylová indukčnosť transformátora),  $R_1 = 4,5$   $\Omega$  (odpor vinutia),  $L_2 = 1,5$   $\mu$ H (magnetizačný indukčnosť transformátora a paralelná indukčnosť),  $C_2 = 56$  pF (rozptylová kapacita vinutia transformátora a diód),  $R_2 = 15$   $\Omega$  (sériový odpor rozptylovej kapacity),  $R_3 = 10$  k $\Omega$  (odpor záťaže).

Impedancia sériovej časti je daná vzťahom:

$$Z_{ser} = \frac{1+sC_1R_1+s^2C_1L_1}{sC_1}, \quad (5.1)$$

Frekvenčná závislosť modulu sériovej časti je uvedená na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Frekvenčná závislosť modulu sériovej časti väzbového člena. [13]

Impedancia paralelnej časti je daná vzťahom:

$$Z_{par} = \frac{sL_2R_3 + s^2C_2R_2L_2R_3}{R_3 + s(L_2 + C_2R_2R_3) + s^2(C_2L_2R_3 + C_2R_2L_2)}, \quad (5.2)$$

A frekvenčná závislosť modulu paralelnej časti väzbového člena je uvedená na obr. 5.6.

Výsledná impedancia väzbového člena je daná vzťahom:

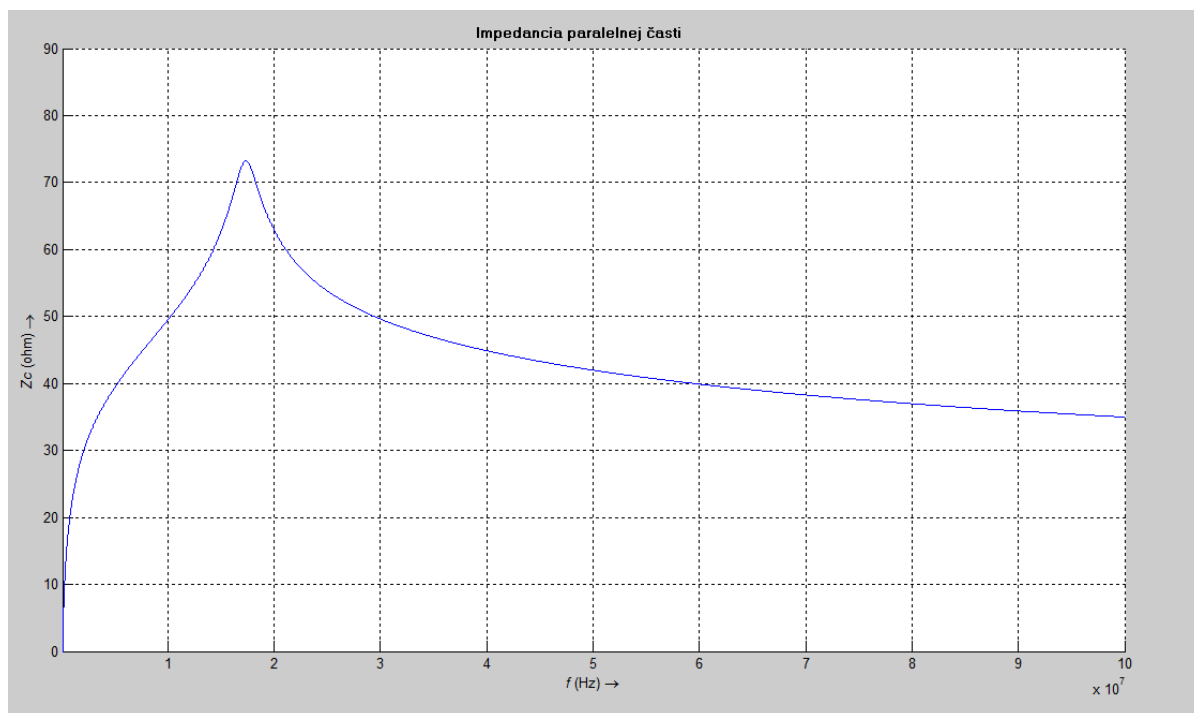
$$Z = \frac{R_3 + s(L_2 + C_2R_2R_3 + C_1R_1R_3) + \dots}{s(C_1R_3) + \dots}$$

$$\frac{\dots + s^2(C_2R_2C_1R_1R_3 + C_2R_2L_2 + L_2C_1R_1 + s^2(C_1L_1R_3 + C_2L_2R_3 + L_2C_1R_3) + \dots}{\dots + s^2(C_1L_2 + C_2R_2C_1R_3) + \dots}$$

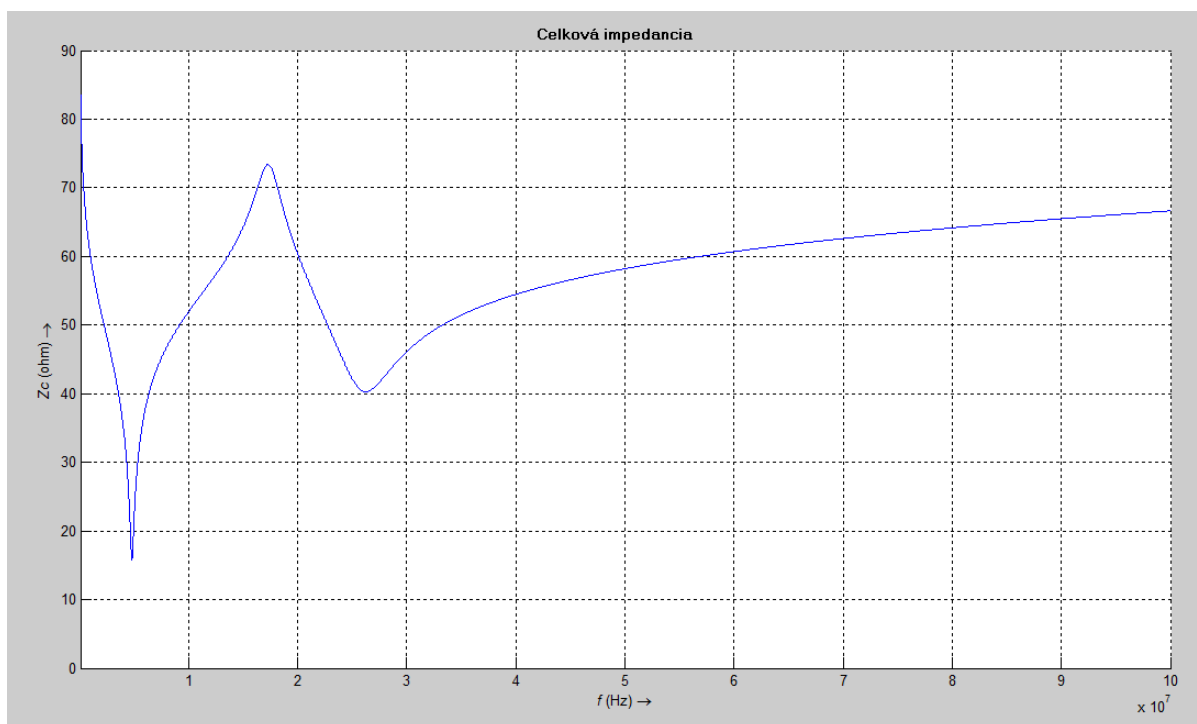
$$\frac{\dots + s^3(C_2L_2C_1R_1R_3 + C_2R_2L_2C_1R_1 + C_2R_2C_1L_1R_3) + s^3(L_2C_1L_1 + C_2R_2L_2C_1R_3) + \dots}{\dots + s^3(C_2L_2C_1R_3 + C_2R_2L_2C_1) + \dots}$$

$$\frac{\dots + s^4(C_2L_2C_1L_1R_3 + C_2R_2L_2C_1L_1)}{\dots + s^4(C_2L_2C_1L_1R_3 + C_2R_2L_2C_1L_1)} \quad (5.3)$$

Frekvenčná závislosť modulu impedancie modelu väzbového člena je uvedená na obr. 5.7. [13]



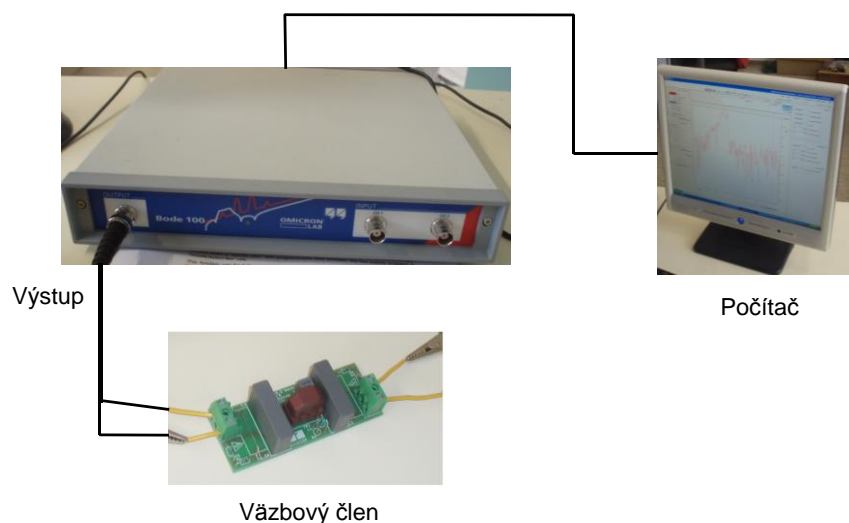
Obr. 5.6: Frekvenčná závislosť modulu paralelnej časti väzbového člena. [13]



Obr. 5.7: Frekvenčná závislosť modulu väzbového člena. [13]

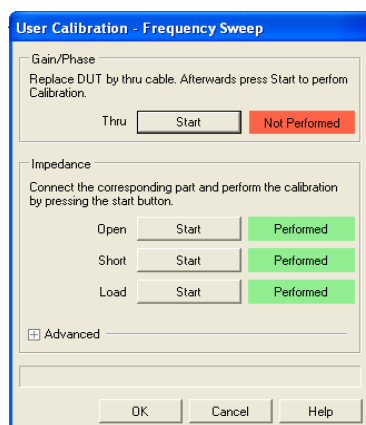
## 5.4 Meranie impedancie väzbových členov

V rámci diplomovej práce boli zmerané impedancie kapacitného (MCB10.2) a induktívneho (ICU-438) väzbového člena. Na meranie týchto impedancií bol zvolený program OMICRON Lab a vektorový analyzátor Bode 100. Na tomto zariadení je možné zmerať vlastnosti obvodov a súčiastok vo frekvenčnom rozsahu od 1Hz až po 40MHz. Taktiež tento prístroj môže pracovať ako frekvenčný analyzátor, merač impedancie, merač fáze a generátor sínusových signálov.



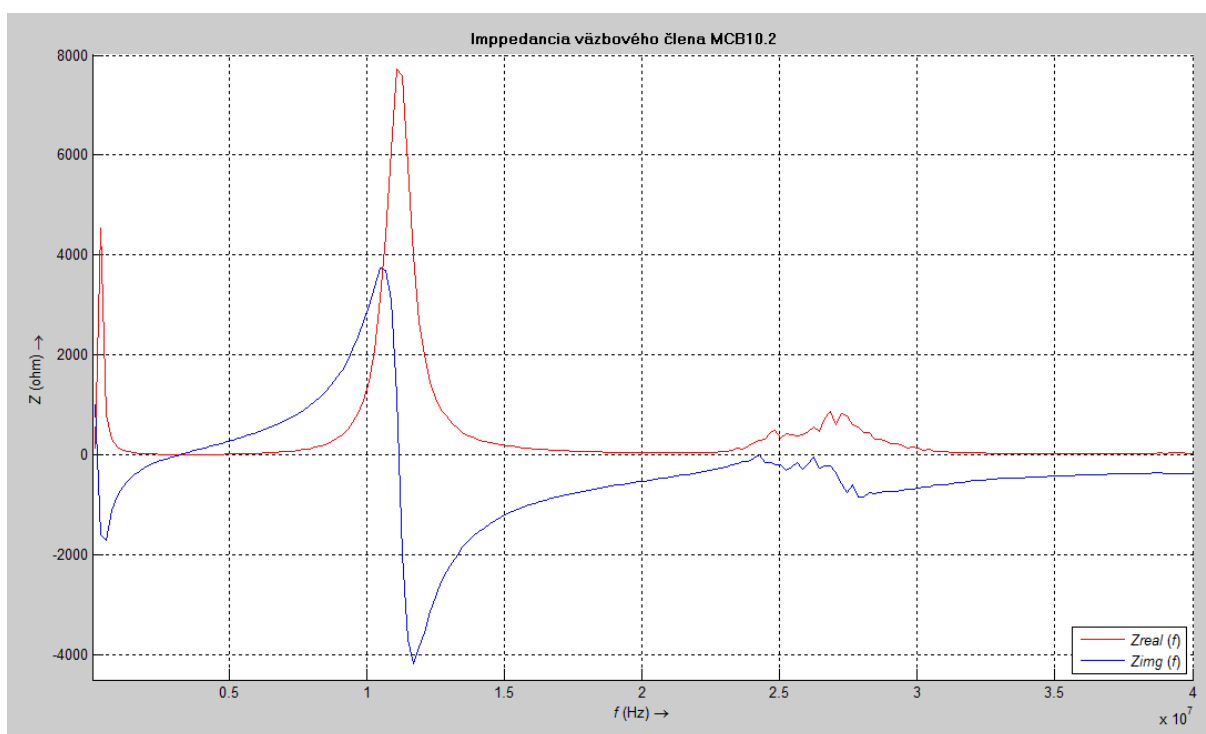
Obr. 5.8: Schéma zapojenia pri meraní impedancie väzbového člena MCB10.2.

Pred začiatkom merania bola potrebná kalibrácia analyzátora. Zátťaž, ktorá bola pripojená počas kalibrácie zariadenia mala veľkosť  $50\ \Omega$ . Zapojenie pozostávalo z prepojenia vektorového analyzátora a počítača, v ktorom bol nainštalovaný program OMICRON Lab. Väzbový člen bol pripojený na výstup analyzátora. Schéma zapojenia je na obr. 5.8. Frekvencia bola zadaná v rozsahu 100 kHz - 40 MHz.

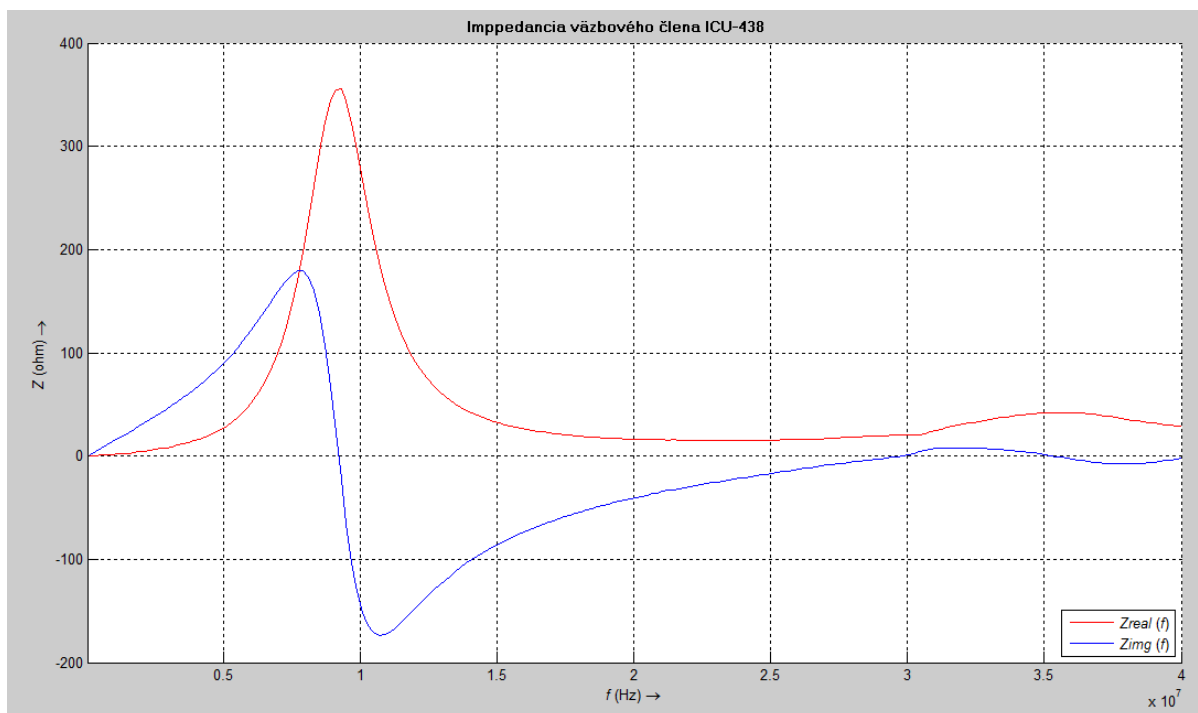


Obr. 5.9: Zobrazenie kalibrácie vektorového analyzátora.

Z nameraných hodnôt impedancie oboch väzbových členov je z grafov zrejmé, že sa jedná o pásmovú priepusť. Pre väzbový člen MCB10.2 je šírka frekvenčného priepustného pásma 10,8-11,51 MHz. Rezonančná frekvencia sa nachádza na 11,07 MHz. Väzbový člen ICU-438 má priepustné pásmo v rozmedzí 8,215-10,19 MHz a jeho rezonančná frekvencia je na 9,277 MHz. Tieto hodnoty je možné zistiť zo skriptu pod názvom mcb\_zmerana\_impedancia.m.



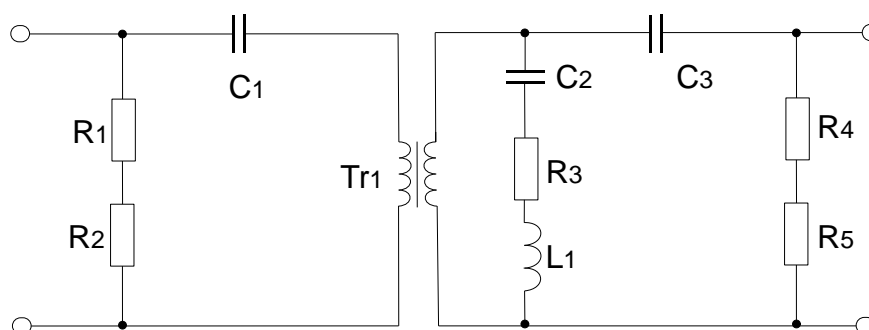
Obr. 5.10: Odmeraná impedancia väzbového člena MCB10.2.



Obr. 5.11: Odmeraná impedancia väzbového člena ICU-438.

## 5.5 Návrh modelu väzbového člena MCB10.2

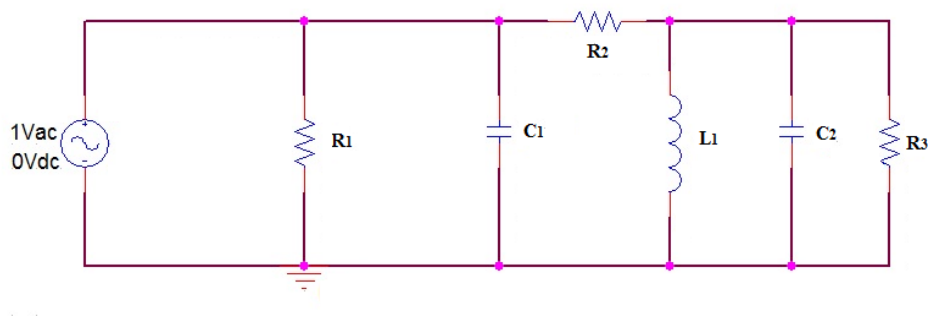
V rámci tejto diplomovej práce bol vytvorený model väzbového člena na základe nameraných hodnôt impedancie. Schéma člena je na obr. 5.12. Model tohto člena bol navrhnutý z frekvenčného priepustného pásma a rezonančnej frekvencie. Pre realizáciu modelu bol použitý program Pspice.



Obr. 5.12: Obvodová schéma väzbového člena MCB10.2.

Navrhnutý model člena je na obr. 5.13. Hodnoty prvkov v modeli sú  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = 0,11 \text{ pF}$ ,  $R_2 = 0,001 \text{ }\mu\Omega$ ,  $L_1 = 11,75 \text{ }\mu\text{H}$ ,  $C_2 = 18,5 \text{ pF}$ ,  $R_3 = 7,7 \text{ k}\Omega$ . V programe Matlab bola

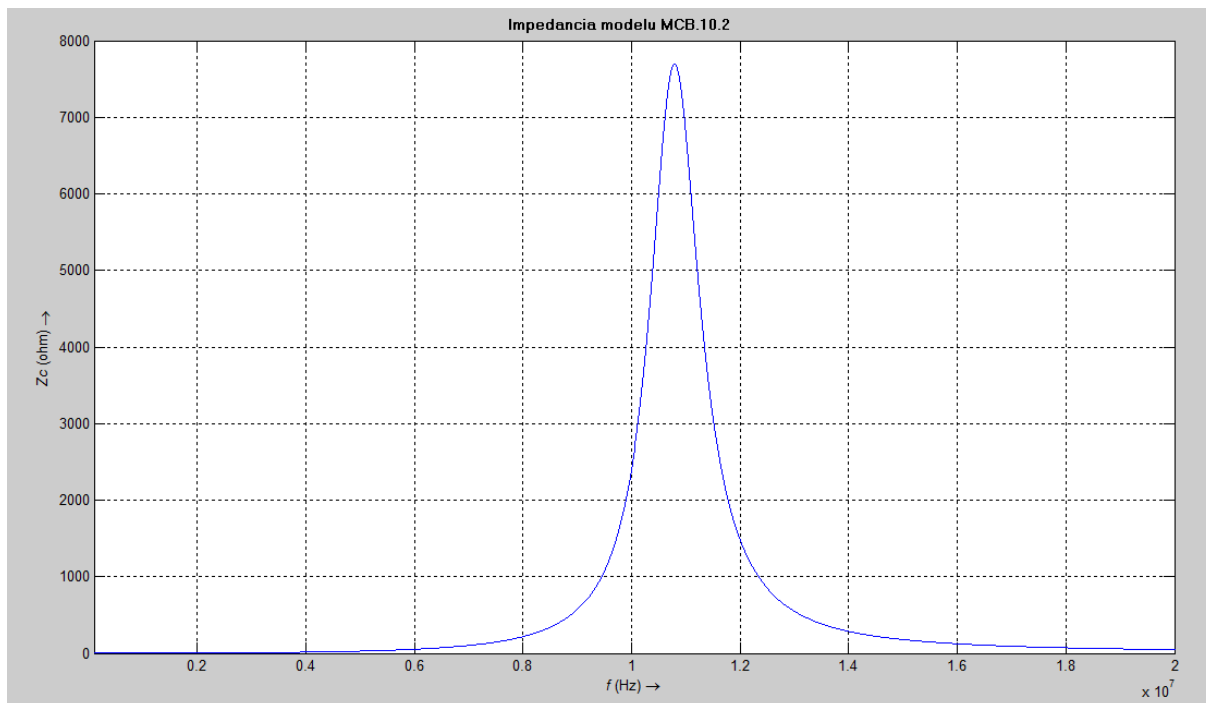
zároveň vypočítaná impedancia tohto modelu, ktorú nájdete v skripte pod názvom mcb\_zmerana\_impedancia.m. Obr. 5.14. zobrazuje celkovú impedanciu modelu.



Obr. 5.13: Navrhnutý model väzbového člena so zdrojom striedavého napätia.

Celková impedancia modelu je daná vzťahom

$$Z_c = \frac{R_1 R_2 (R_3 + sL_1 + s^2 L_1 C_2 R_3) + sL_1 R_3 (R_1 + R_2 + sR_1 C_1 R_2)}{(R_1 R_2 + sR_1 C_1 R_2) \cdot (R_3 + sL_1 + s^2 L_1 C_2 R_3)}. \quad (5.4)$$



Obr. 5.14: Celková impedancia navrhnutého modelu.



# 6 Teória modelovania

## 6.1 PLC komunikačný systém

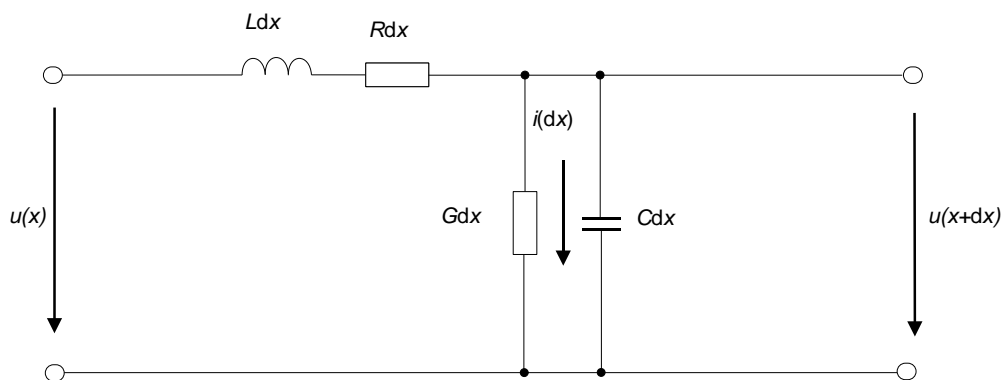
Pri tvorbe komunikačného systému PLC komunikácie je dôležité modelovať modely vedení, taktiež netreba zabudnúť ani na zdroje rušenia a na model komunikačného systému vysielača a prijímača komunikácie. Model PLC komunikačného systému dostaneme spojením týchto modelov. Pomocou tohto modelu s rôznymi modelmi vedenia je možné urobiť analýzu silnoprúdovej siete, z hľadiska možností rôznych kombinácií PLC technológií, šifrovania, moduláciami, kódovaniami atď., tak aby v uvedených systémoch boli dosiahnuté čo najlepšie výsledky parametrov dátového prenosu. Jednou z možností modelovania silnoprúdových vedení, je modelovanie silnoprúdového vedenia ako prostredie s viacestným šírením signálu. Z topológie distribučnej siete prípadne na základe merania sú získavané parametre vedenia. Ďalšou možnosťou je modelovanie silnoprúdových vedení pomocou kaskádnych parametrov. Tie popisujú závislosť vstupných a výstupných napätí a prúdov pomocou dvojbranov. Treťou možnosťou je modelovanie náhradného modelu vedenia, ktorý sa popisuje primárnymi a sekundárnymi parametrami. [14]

## 6.2 Náhradný model vedenia

Modelovanie a simulácia silnoprúdových vedení je často založená na časovo závislých telegrafných rovniciach. Tieto rovnice sú určené pre elementárny úsek vedenia. Elementárny úsek  $dx$  dvojvodičového vedenia sa dá popísať pomocou náhradného modelu zloženého z pasívnych prvkov. Elementárne parametre sú  $R'dx$ ,  $L'dx$ ,  $C'dx$ ,  $G'dx$ . Po aplikovaní Kirchhoffových zákonov na tento model dostaneme tieto telegrafné rovnice:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + R' i + L' \frac{\partial i}{\partial t} = 0, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} + G' u + C' \frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad (6.2)$$



Obr. 6.1. Náhradná schéma vedenia. [14]

Merný činiteľ prenosu  $\gamma$  a charakteristická impedancia  $Z_c$  (parametre popisujúce silnoprúdové vedenie) dostaneme riešením a úpravami rovníc (6.1) a (6.2):

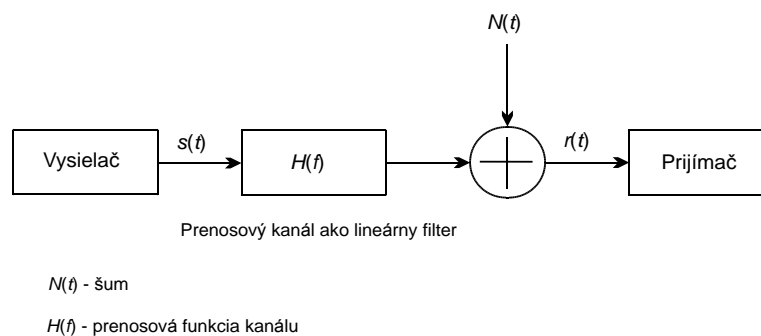
$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}, \quad (6.3)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}, \quad (6.4)$$

kde  $\alpha$  je merný útlm,  $\beta$  je merný fázový posuv. [14]

### 6.3 Modelovanie PLC kanálu

Obr. 6.2 zobrazuje zjednodušený model PLC kanálu používaný v komunikačnej technike. Model je popísaný prenosovou funkciou  $H(f)$  a parametrami rušenia, ktoré sú okrem šumu popísané ako časovo premenný lineárny filter charakterizovaný frekvenčnou odozvou. Šum je opísaný ako aditívny interferujúci náhodný proces. Z obr. 6.2 je možné získať prenosovú funkciu kanálu ako prenosovú funkciu prostredia s viaccestným šírením alebo ako prenosovú funkciu dvojbranov s kaskádnymi parametrami. [14]

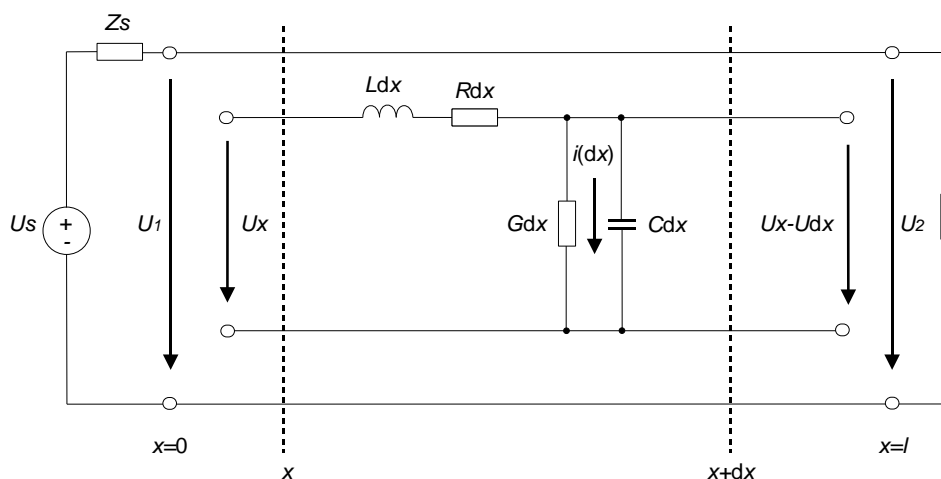


Obr. 6.2: Model PLC kanálu. [14]

## 6.4 Prostredie s viaccestným šírením

Na silnoprúdové vedenie sa môže hľadiť ako na viaccestný kanál. Viaccestné šírenie zapríčiňujú impedančne neprispôsobene odbočky vedenia. Distribúcia signálu cez náhradný model silnoprúdového vedenia je na obr. 6.3. Prenosovú funkciu vedenia dĺžky  $l$  popíšeme vzťahom (6.5), ak je vedenie ekvivalentné vlne šíriacej sa od zdroja k záťaži. [14]

$$H(f) = \frac{U(x=l)}{U(x=0)} = e^{-\gamma(f)l} = e^{-\alpha(f)l} e^{-j\beta(f)l}. \quad (6.5)$$



Obr. 6.3: Distribúcia signálu cez silové vedenie. [14]

## 6.5 Prenosová funkcia prostredia s viaccestným šírením

Silnoprúdové vedenie vykazuje silnú nehomogenitu. Tá sa prejavuje odrazmi, viaccestným šírením a viacnásobným príjmom signálu. Model viaccestného silnoprúdového vedenia je na obr. 6.4 a prenášaný signál prejde cez  $N$  rozdielnych ciest k prijímaču. Definovanie všetkých ciest  $i$  je s pomocou určitým meškaním  $T_i$  a faktorom útlmu  $C_i$ .

Popis impulzovej odozvy  $h(t)$ :

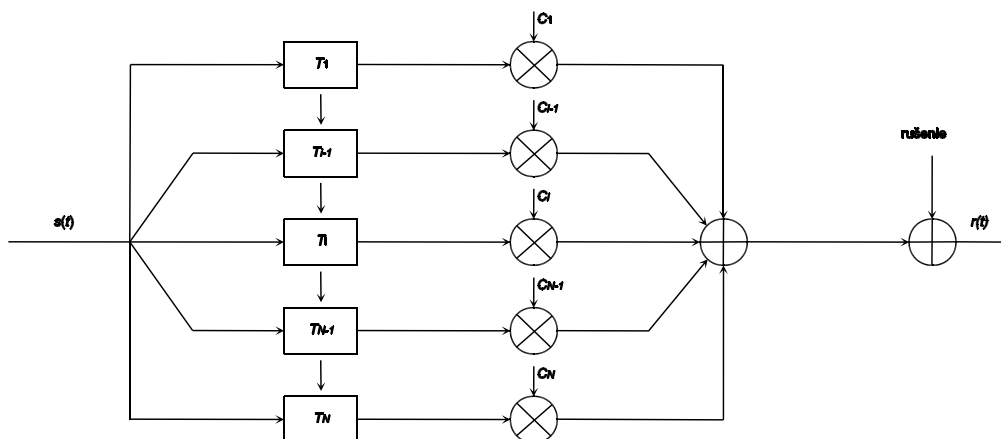
$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \delta(t - \tau_i) \Leftrightarrow H(f) = \sum_{i=1}^N C_i e^{-j2\pi f \tau_i}, \quad (6.6)$$

Výsledná prenosová funkcia sa dá modelovať ako prostredie s viaccestným šírením signálu:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i A(f, l_i) e^{-j2\pi f \tau_i}. \quad (6.7)$$

Kde  $g_i$  je váha cesty predstavujúca odrazy a faktory prenosu pozdĺž cesty. Dosadením útlmu vedenia  $A(f, l_i)$  sa získa výsledná prenosová funkcia. Prenosová funkcia vedenia zahrňuje

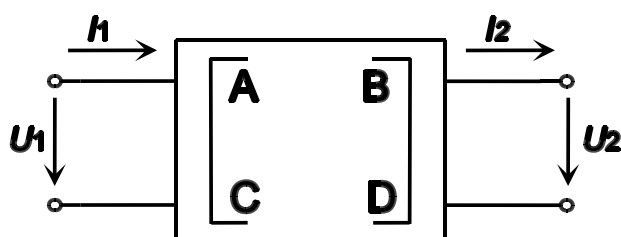
charakteristické parametre vedenia, premennú impedanciu, útlm a viaccestné šírenie signálu. [14]



Obr. 6.4: Model vedenia s viaccestným šírením. [14]

## 6.6 Kaskádne parametre vedenia dvojbranu

Z pohľadu prenosu elektrickej energie je potrebné sledovať rôzne javy a preto sa vo väčšine prípadov model vedenia s rovnomerne rozloženými parametrami v elektroenergetike nepoužíva. Ako náhrada za tento model vedenia sa používa model pomocou dvojbranov. Táto náhrada je dostatočne presná pre zámer prenosu elektrickej energie. Silnoprúdové vedenie sa mnohokrát skladá z rôznych úsekov. Tieto úseky je možné modelovať pomocou dvojbranov a špecifikovať pomocou kaskádnych parametrov. Rovnice v kaskádnom tvare, ktoré opisujú dvojbran vychádzajúci zo všeobecného dvojbranu. Parametre silnoprúdového vedenia sa koncentrujú iba do jedného bodu a napätie s prúdom sú vo všetkých miestach vedenia v jednom čase rovnaké. Medzi často používané dvojbrany patria  $\Gamma$  článok, T článok a  $\Pi$  článok. Pre modelovanie ďalších vlastností či pripojených zariadení je možné zapojiť články kaskádne za sebou a získať tak celý úsek silnoprúdového reťazca. Preto sa na popisovanie dvojbranu používa kaskádny tvar rovníc, ktorý vychádza zo všeobecného dvojbranu. [14]



Obr. 6.5: Dvojbran. [14]

Kaskádne rovnice dvojbranu:

$$U_1 = A \cdot U_2 + B \cdot I_2, \quad (6.8)$$

$$I_1 = C \cdot U_2 + D \cdot I_2, \quad (6.9)$$

Maticový tvar

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}. \quad (6.10)$$

Matica  $\mathbf{A}$  sa taktiež označuje ako matica **ABCD** prenosových parametrov a prvky matice sú značené veľkými písmenami  $A, B, C, D$  (bývajú taktiež nazývané ako Blondelovy konštanty). V tejto matici sú zahrnuté parametre označované ako  $a_{11}$  až  $a_{22}$ . Dané rovnice sú používané pre stanovenie napätia a prúdu na začiatku vedenia, ak poznáme pomery na konci vedenia. V prípade výpočtu napätia a prúdu a známych pomerov na začiatku vedenia, kaskádne rovnice sú zmenené. Fyzikálny význam týchto kaskádnych parametrov sú stavy vedenia nakrátko a naprázdno.

$$A = a_{11} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_2=0}, \quad (6.11)$$

$$B = a_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{U_2=0}, \quad (6.12)$$

$$C = a_{21} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{I_2=0}, \quad (6.13)$$

$$D = a_{22} = \frac{I_1}{I_2} \Big|_{U_2=0}, \quad (6.14)$$

kde parameter  $A$  je prenos napätia, parameter  $B$  je prenosová impedancia, parameter  $C$  je prenosová admitancia, parameter  $D$  je spätný prenos prúdu. [13]

Pri počítačovom modelovaní časti vedenia vrátane prvkov pripojených do elektrickej siete je dobré popísať jednotlivé bloky kaskádnyimi parametrami a celý reťazec modelovať pomocou kaskádnych spojených dvojbranov. Týmto spôsobom je možné vedenie modelovať celé, prípadne skúmať vplyv jednotlivých častí vedenia.

Pri rozhodovaní o počte článkov je potrebné postupovať pomocou nasledujúcej úvahy. Pre krátke vedenie (napr. môžeme uvažovať náhradný model s jedným článkom, ktorý je popísaný primárnymi parametrami) platí

$$|\gamma \cdot l| < 1. \quad (6.15)$$

Pre elektricky dlhé vedenia platí

$$|\gamma \cdot l| > 1. \quad (6.16)$$

Je možné vytvoriť model viacnásobným kaskádnym zapojeným dvojbranov, popísaných maticou  $A$ .

Presnosť modelu vedenia je závislý na počte elementárnych dvojbranov. Pri väčšom počte dvojbranov je aj model presnejší. Na druhej strane, ale pri veľkom počte dvojbranov sú výpočty komplikovanejšie a aj konštrukcia vedenia je náročnejšia. Pre počet článkov je nutné stanoviť kritérium. Meškanie vedenia a maximálny frekvenčný rozsah (používaný vo vedení) sa využíva pri stanovení počtu článkov. Pravidlo, ktorým je požadované sa riadiť, je to aby pomer periódy najvyššej prenášanej frekvencie  $f_s$  a meškania jedného článku  $t_d$  bol minimálne dvojnásobný ako počet použitých elementárnych článkov  $n_e$ . Vo väčšine prípadov sa táto podmienka ukazuje byť postačujúca. Pre dostatočne vysoké frekvencie sa dá určiť celkové meškanie  $T_D$  ako

$$T_D = \sqrt{LC}. \quad (6.17)$$

Pri modely, ktorý je zložený z  $n_e$  elementárnych úsekov je meškanie jedného úseku

$$t_d = \frac{T_d}{n_e}. \quad (6.18)$$

Pre najvyššiu prenášanú frekvenciu je počet elementárnych dvojbranov [13]

$$n_e = 2\pi f_s \sqrt{LC}. \quad (6.19)$$

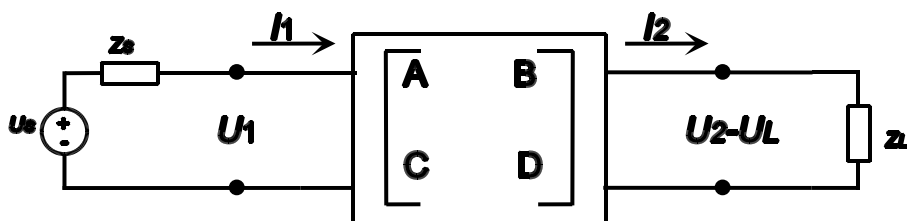
## 6.7 Prenosová funkcia dvojbranu

Z obr. 6.6 a z kaskádnej matice dvojbranu z rovnice (6.10) je odvodená prenosová funkcia silnoprúdového vedenia. Prenosovú funkciu určuje pomer  $U_L/U_s$ . Napäťové pomery na konci vedenia v závislosti na napätí zdroja  $U_s$  [14]:

$$U_1 = U_s - Z_S I_1 = AU_2 + BI_2. \quad (6.20)$$

Dosadením  $I_1$ ,  $I_2$  a vyjadrením  $U_2$  :

$$H = \frac{U_L}{U_s} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_S + DZ_S}. \quad (6.21)$$



Obr. 6.6: Zapojený dvojbran so zdrojom a záťažou. [14]

Výpočet vstupnej impedancie  $Z_1$  :

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D}. \quad (6.22)$$

Prenosovým vedením môžu byť modelované dva paralelné káble. Prenosové vedenie je charakterizované jeho impedanciou  $Z_C$  a jeho konštantou šírenia (merný činiteľ prenosu)  $\gamma$ . Charakteristická impedancia  $Z_C$  a konštanta šírenia  $\gamma$  sa spočítajú ako:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (6.23)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (6.24)$$

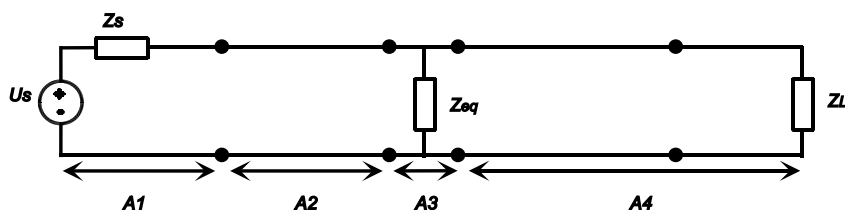
kde  $R$  je odpor,  $L$  je indukčnosť,  $G$  je vodivosť a  $C$  je kapacita.

Kaskádne parametre **ABCD** matice prenosového vedenia je možné vypočítať ako [14]:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_C \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix}. \quad (6.25)$$

## 6.8 Prenosová funkcia dvojbranu s odbočkami

Na obr. 6.7 je vzorový model s jednou odbočkou. Táto odbočka je vymenená odpovedajúcou impedanciou  $Z_{eq}$ . Vysielač a prijímač sú impedančne neprispôsobené káblu, preto tu bude dochádzať k odrazom a zariadenie na odbočke má impedanciu  $Z_{br}$ .

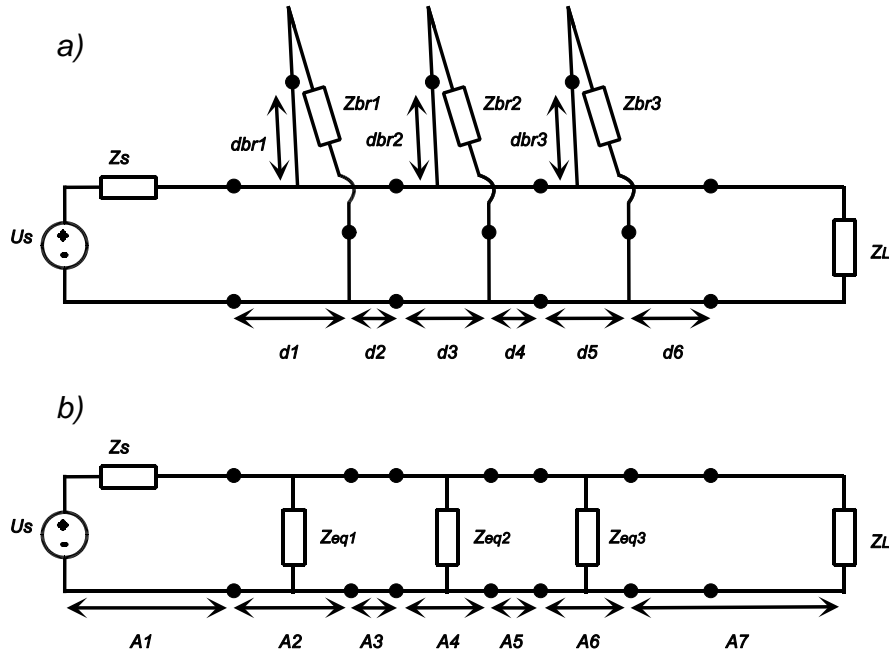


Obr. 6.7: Zjednodušené vedenie s jednou odbočkou.

Impedancia odbočky sa vypočíta takto:

$$Z_{eq} = Z_C \frac{Z_{br} + Z_C \tanh(\gamma_{br} d_{br})}{Z_C + Z_{br} \tanh(\gamma_{br} d_{br})}, \quad (6.24)$$

kde  $Z_{br}$  je charakteristická impedancia a  $\gamma_{br}$  je merný činiteľ prenosu pre odbočku. [15]



Obr. 6.8: a) vedenie s troma odbočkami, b) zjednodušené vedenie s 3 odbočkami.

Obr. 6.7 zobrazuje vedenie s jednou odbočkou, ktorá je znázornená ako viacnásobné zapojenie elementárnych dvojbranov. Matice týchto dvojbranov sú popísané takto:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.25).$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 d_1) & Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) \\ \frac{1}{Z_1} \sinh(\gamma_1 d_1) & \cosh(\gamma_1 d_1) \end{bmatrix}, \quad (6.26)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{eq}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.27)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 d_2) & Z_2 \sinh(\gamma_2 d_2) \\ \frac{1}{Z_2} \sinh(\gamma_2 d_2) & \cosh(\gamma_2 d_2) \end{bmatrix}, \quad (6.28)$$

kde  $Z_1$  a  $Z_2$  sú charakteristické impedancie,  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$  sú merné činitele prenosu pre druhý a štvrtý dvojbran.

Pomocou vyššie uvedených rovníc prvky ABCD matice na obr. 6.7 sú dané ako [16]:

$$A = \cosh(\gamma_2 d_2) \alpha + \frac{\sinh(\gamma_2 d_2)}{Z_2} \beta, \quad (6.29)$$

$$B = Z_2 \cosh(\gamma_2 d_2) \alpha + \cosh(\gamma_2 d_2) \beta, \quad (6.30)$$



$$C = \cosh(\gamma_2 d_2) \xi + \frac{\sinh(\gamma_2 d_2)}{Z_2} \vartheta, \quad (6.31)$$

$$D = Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) \xi + \cosh(\gamma_2 d_2) \vartheta, \quad (6.32)$$

kde

$$\alpha = \cosh(\gamma_1 d_1) + \frac{Z_S}{Z_1} \sinh(\gamma_1 d_1), \quad (6.33)$$

$$\beta = Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) + Z_S \cosh(\gamma_1 d_1), \quad (6.34)$$

$$\xi = Z_1 \cosh(\gamma_1 d_1) + Z_S \sinh(\gamma_1 d_1) + \frac{Z_{eq} \sinh(\gamma_1 d_1)}{Z_1 Z_{eq}}, \quad (6.35)$$

$$\vartheta = \frac{Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) + Z_S \cosh(\gamma_1 d_1)}{Z_{eq} + \cosh(\gamma_1 d_1)}. \quad (6.36)$$

Výsledná kaskádna matica vedenia s jednou odbočkou sa vypočíta ako súčin jednotlivých matic:

$$\mathbf{A} = \prod_{i=1}^n \mathbf{A}_i, \quad (6.37)$$

kde  $n$  je počet častí opísaných kaskádnymi maticami. [13]

## 7 Modelovanie silnoprúdového vedenia

V prvej časti tejto kapitoly bude uvedený spôsob, akým sú vypočítané primárne a sekundárne parametre vedenia. Výpočty parametrov sú prevedené pre jeden typ káblu typu CYKY 3x1,5. Tieto vypočítané parametre slúžia k vypočítaniu prenosovej funkcie vedenia. Prenosová funkcia vedenia je vypočítaná a graficky spracovaná pre jednu, dve, tri a štyri odbočky. Grafické spracovanie výsledkov je vytvorené v programovom prostredí Matlab.

### 7.1 Výpočet primárnych a sekundárnych parametrov

Pre výpočet týchto parametrov sú použité tieto rovnice (7.1), (7.2), (7.3), (7.4), (7.5), (7.6) použité v [17].

$$R = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 f}{\pi \sigma r^2}} \left[ \frac{\left(\frac{a}{2r}\right)}{\sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 - 1}} \right], \quad (7.1)$$

$$L = L_{\text{in}} + L_{\text{ex}}, \quad (7.2)$$

$$L_{\text{in}} = \frac{R}{2\pi f}, \quad (7.3)$$

$$L_{\text{ex}} = \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{a}{2r} \right), \quad (7.4)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\cosh^{-1} \left( \frac{a}{2r} \right)}, \quad (7.5)$$

$$G = 2\pi f C \tan \delta, \quad (7.6)$$

kde  $\mu_r$  je relatívna magnetická permeabilita,  $\mu_0$  je permeabilita vákua,  $\sigma$  je merná vodivosť medi,  $a$  je vzdialenosť stredov vodičov,  $\epsilon_r$  je relatívna dielektrická konštanta,  $\epsilon_0$  je permitivita vákua,  $\tan \delta$  je stratový činiteľ.

Sekundárne parametre sú odvodené z rovníc (7.7) a (7.8). Keďže pre frekvencie do 30 MHz je charakteristická impedancia počítaná zjednodušeným spôsobom, je použitá táto rovnica:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (7.7)$$

Merný útlm  $\alpha$  je spočítaný ako

$$\alpha = \text{Re}\{\gamma\}. \quad (7.8)$$

Tieto vzorce boli použité v skriptoch pre vykreslenie primárnych a sekundárnych parametrov a zároveň sa využívajú pri výpočte prenosovej funkcie. V tab. 7.1 sú uvedené všetky konštanty a rozmery kábla, ktoré sú potrebné pre výpočty. Rozmery kábla sú podľa [18]. Polomer káblu je uvedený v rovnici (7.9) a vzdialenosť medzi stredmi vodičov je uvedená v rovnici (7.10).

**Tab. 7.1: Použité veličiny pri výpočte primárnych a sekundárnych parametrov. [15]**

Význam veličiny	Veličina	Veľkosť
Konduktivita medi	$\sigma$	$58 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$
Permeabilita vzduchu	$\mu_0$	$4\pi 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
Relatívna magnetická permeabilita medi	$\mu_r$	0,9999
Permitivita vákua	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
Relatívna permitivita izolácie	$\epsilon_r$	4
Stratový činiteľ dielektrika	$\tan \delta$	$4 \cdot 10^{-2}$
Polomer vodiča	$a$	0,69099 mm
Vzdialenosť medzi stredmi vodičov	$d$	2,8 mm
Prierez žil	$S$	$1,5 \text{ mm}^2$
Šírka izolácie	$id$	0,7 mm

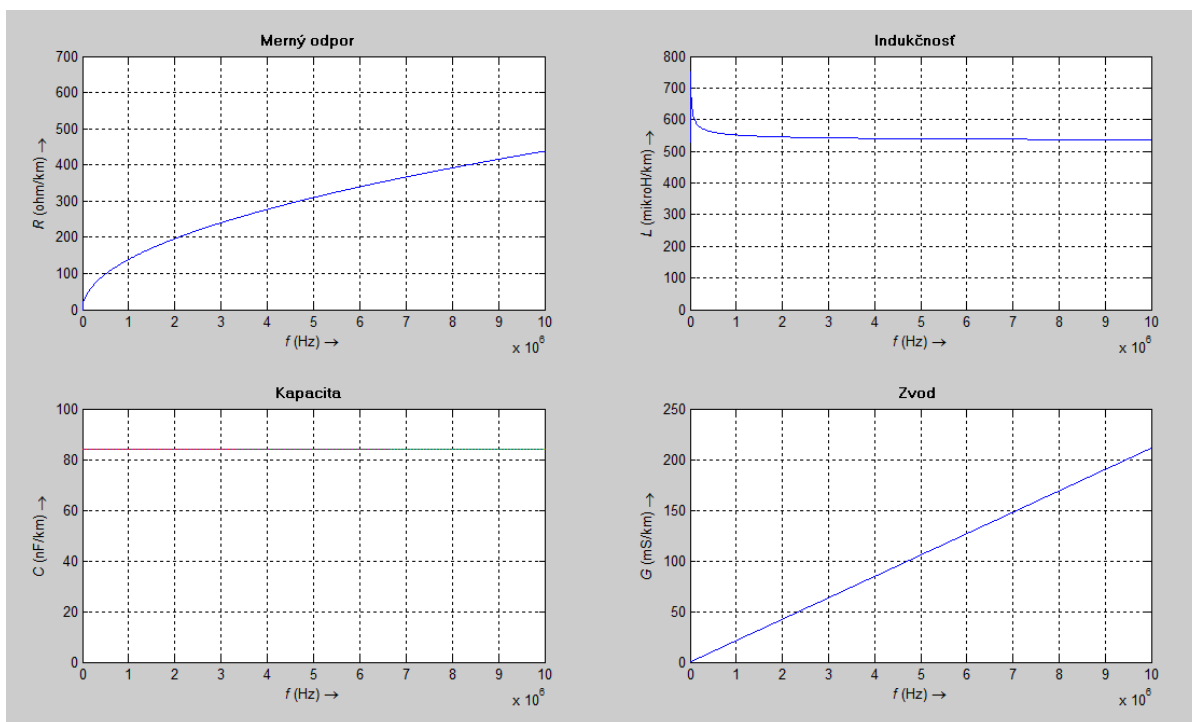
Výpočet polomeru vodiča a vzdialenosti medzi stredmi vodičov :

$$a = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (7.9)$$

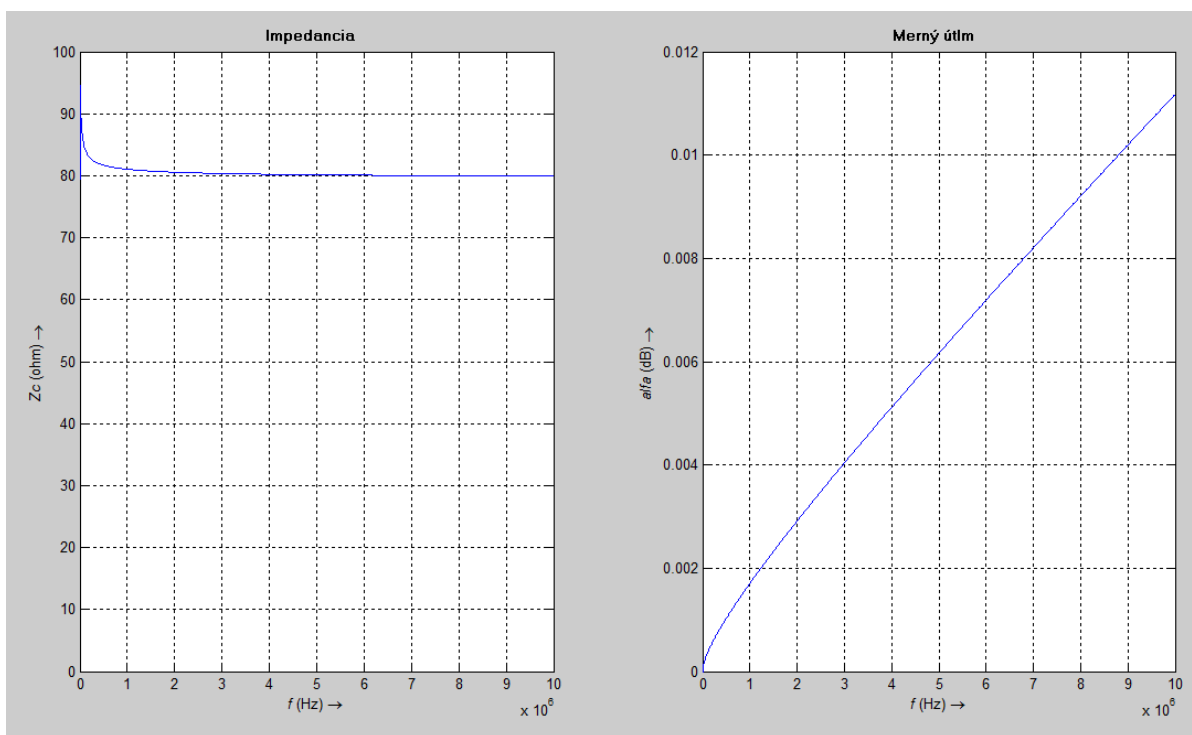
$$d = 2a + 2id, \quad (7.10)$$

kde  $S$  je prierez žil,  $id$  je šírka izolácie.

Na obr. 7.1 sú uvedené priebehy primárnych parametrov vo frekvenčnom rozsahu 0-10 MHz. Tieto priebehy odpovedajú teoretickým priebehom podľa [4]. Sekundárne parametre boli vypočítané z primárnych parametrov. Aj tieto parametre nevykazujú žiadne rozdiely a sú zodpovedajú teoretickým predpokladom. Z týchto vypočítaných parametrov sú v ďalšej podkapitole vypočítané prenosové funkcie pomocou kaskádnych parametrov.



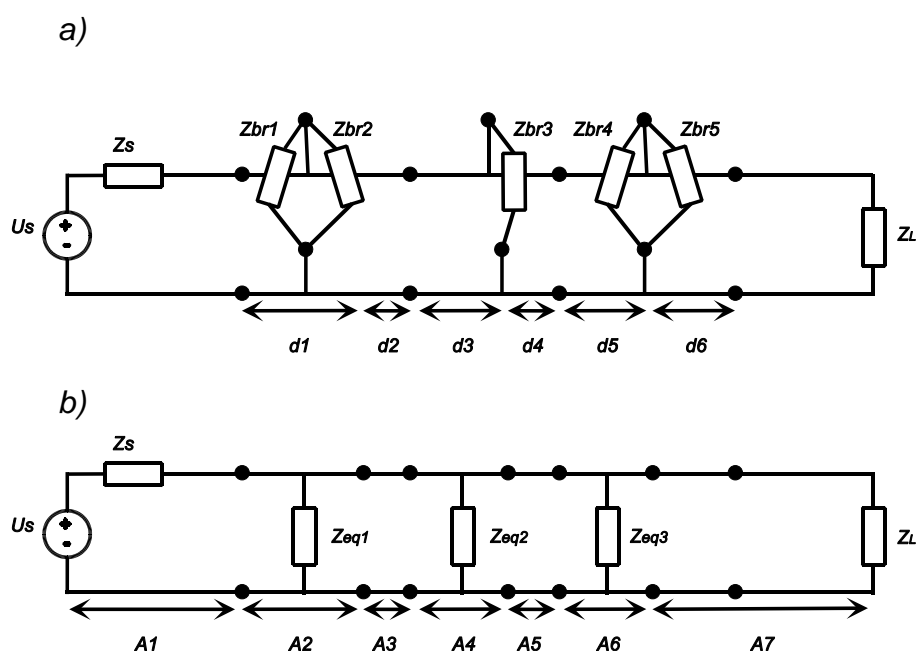
Obr. 7.1: Primárne parametre kabeľu CYKY 3x1,5.



Obr. 7.2: Sekundárne parametre kabeľu CYKY 3x1,5.

## 7.2 Modelovanie vedenia kaskádnyimi parametrami

V predošlej kapitole je popísané modelovanie pomocou kaskádnych parametrov. Táto kapitola obsahuje jej praktický výpočet a grafické výstupy. Na obr. 7.3 je zobrazené vedenie s tromi odbočkami. Tieto odbočky je potrebné nahradiť ekvivalentnou impedanciou. Pri výpočte jednoduchej odbočky má zariadenie pripojené na túto odbočku vlastnú impedanciu, ktorá sa doplní do rovnice (6.24). Naopak, ak sú na odbočke pripojené dva prístroje s vlastnou impedanciou, je potrebné najprv spočítať celkovú impedanciu týchto zariadení. Potom je táto celková impedancia zadaná do rovnice (6.24) ako v prípade jednej (jednoduchéj) odbočky.



Obr. 7.3: a) Vedenie s tromi odbočkami, b) zjednodušené vedenie s tromi odbočkami. [15]

Tab. 7.2: Parametre navrhnutého vedenia. [15]

Parameter	Hodnota [ $\Omega$ ]
$Z_s$	120
$Z_L$	600
$Z_{br1}$	250
$Z_{br2}$	100

Takto sú nahradené všetky odbočky ekvivalentnou impedanciou. Obr. 7.3 a) a obr. 7.3 b) sú si navzájom zodpovedajúce. Obrázok b) je zjednodušením obrázka a). Vedenie je

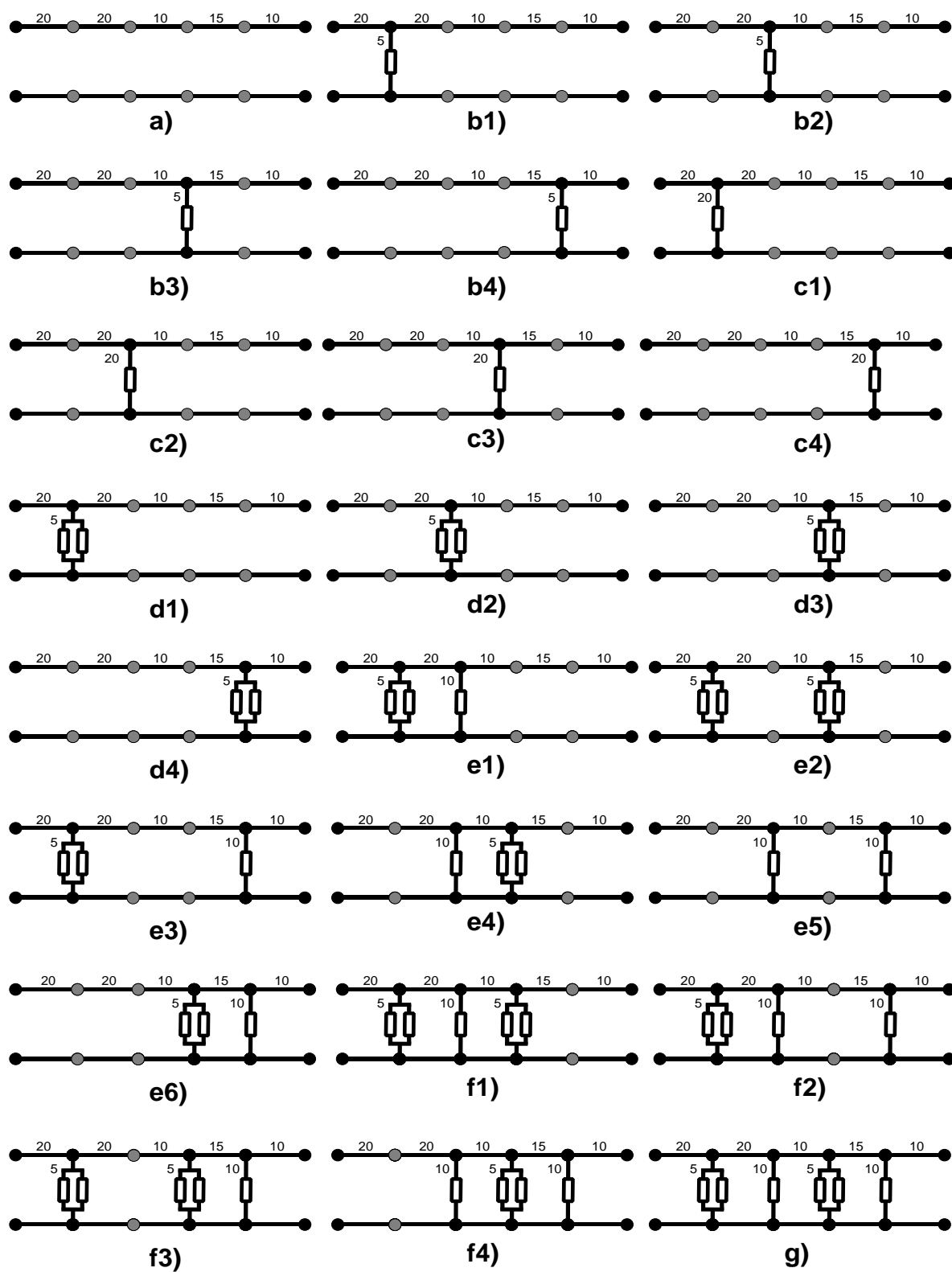
zložené z kaskádnych matíc. Násobením týchto kaskádnych matíc sa získa výsledná kaskádna matica. Pomocou tejto matice je vypočítaná prenosová funkcia celého vedenia.

Pre zistenie vplyvu odbočiek na prenosovú funkciu boli vytvorené topológie, ktoré boli vzájomne porovnávané. Na obr. 7.4 sú zobrazené tieto topológie. Prvá topológia a) je bez odbočky. Ďalších 12 topológií má pripojenú vždy jednoduchú odbočku. Rozdiely medzi týmito odbočkami je vo zväčšovaní vzdialeností odbočky v d1)-d4) topológiách a v zmene pripojeného odporu zariadenia na odbočke, čím sa zmení impedancia prístroja na odbočke v c1)-c4) topológiách oproti b1)-b4) topológiám. V ďalších prípadoch sú vytvorené topológie z jednoduchých a zložených odbočiek.

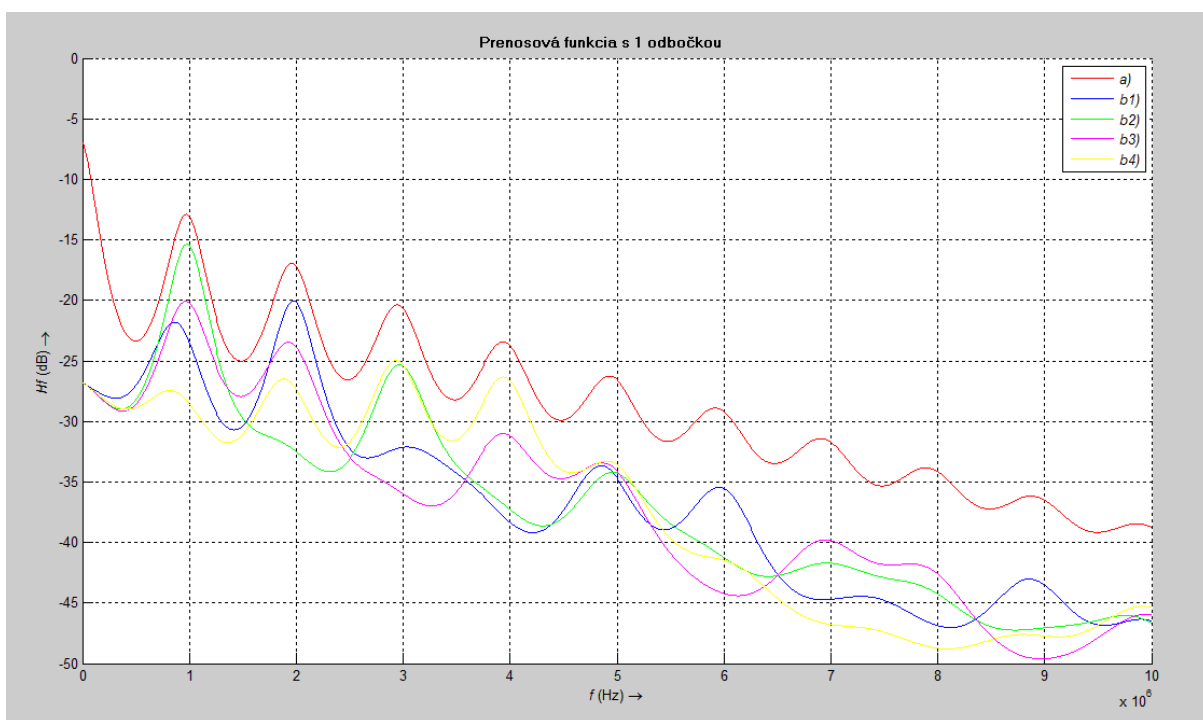
### **7.3 Vplyv na prenosovú funkciu**

Prvé grafy b1)-c4) na obr. 7.4 sú vytvorené s jednou odbočkou. Rozdiel medzi týmito grafmi spočíva v zmene dĺžky odbočky z 5m na 20m (to platí pre c1)-c4) grafy). Útlm v týchto prípadoch vzrástol a prenos v tejto topológii je horší oproti topológiám s menšou dĺžkou odbočky (b1)-b4)). Naopak pri porovnaní a) grafu a c1)-c4) grafov, kde sa zmenila impedancia zariadenia na odbočke zo 100  $\Omega$  na 250  $\Omega$ , sa útlm do 5 MHz približuje útlmu bez odbočky. A teda prenos je lepší ako v prvom a druhom prípade.

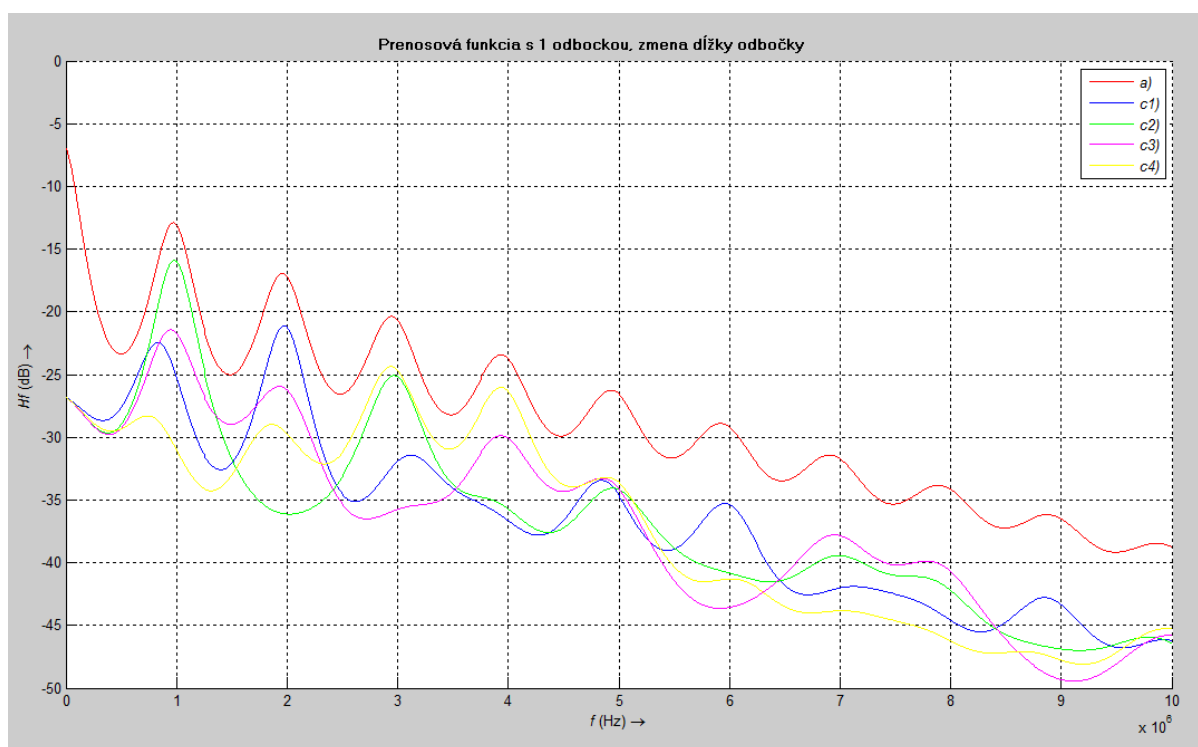
Pre vplyv odbočiek na prenosovú funkciu boli vytvorené ďalšie grafy. Pri ich porovnaní je zrejmé, že útlm pri rastúcej frekvencii a pri väčšom počte odbočiek narastá. Je vidieť, že už jedna odbočka ovplyvní prenosovú funkciu a zhoršuje prenos.



Obr. 7.4: Topológické zapojenia.

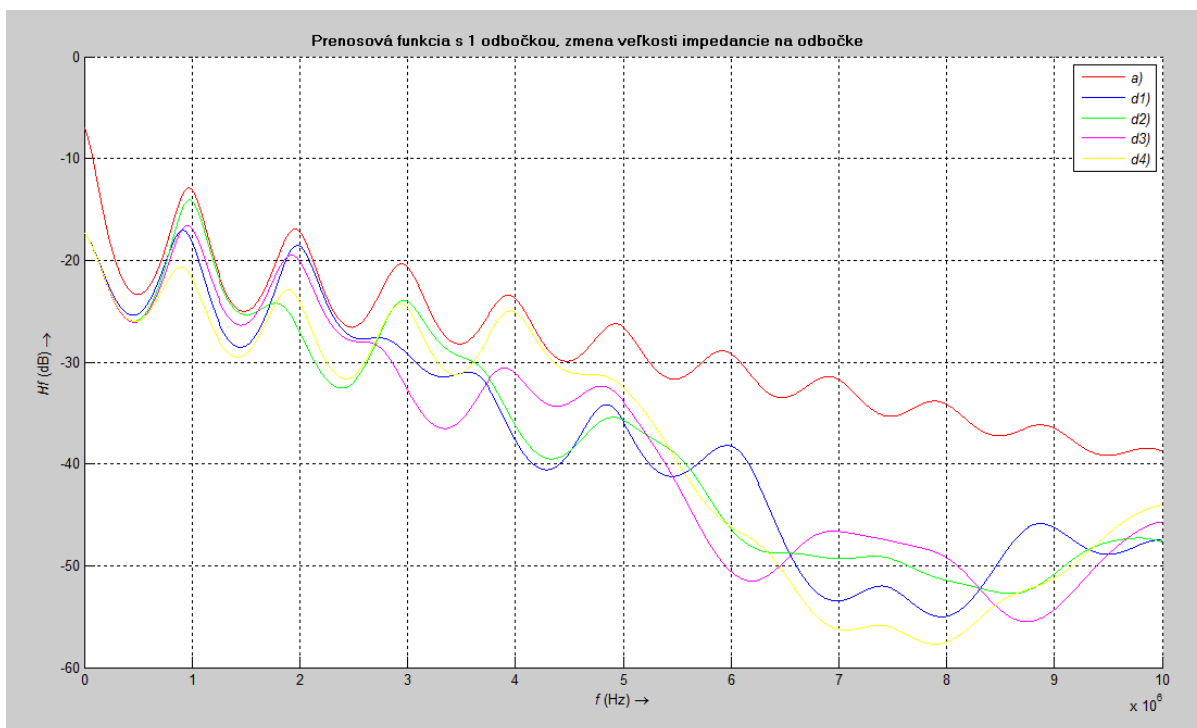


Obr. 7.5: Prenosová funkcia s jednou odbočkou.

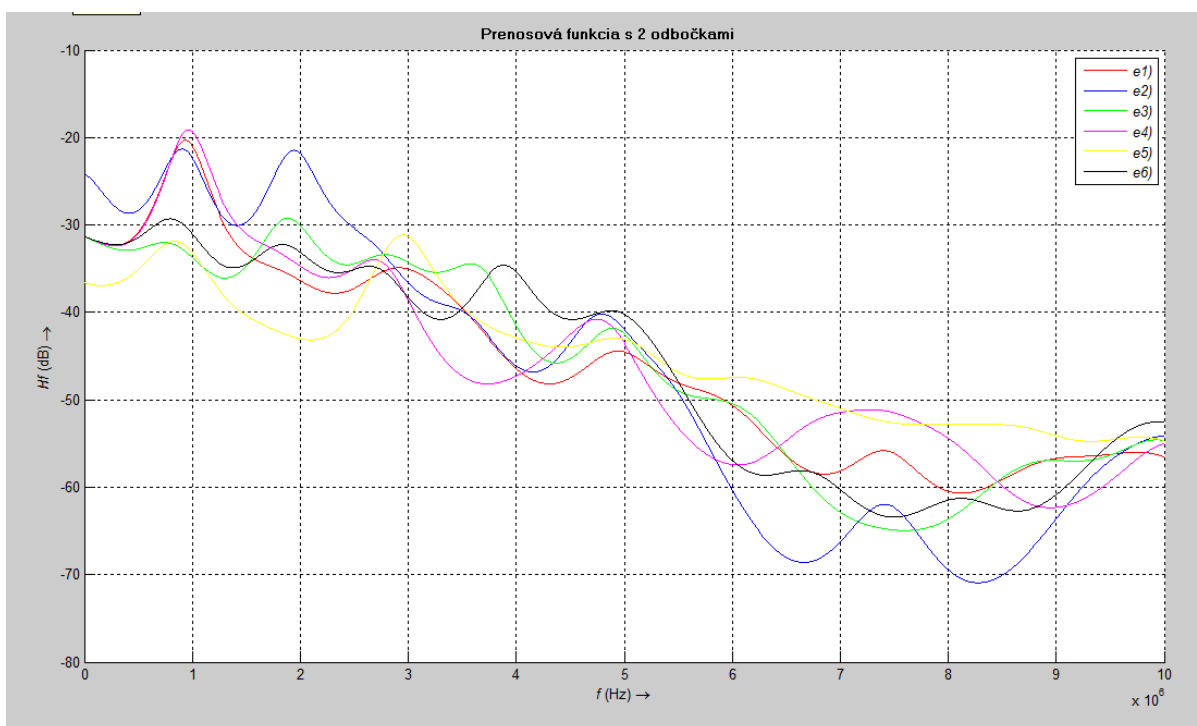


Obr. 7.6: Prenosová funkcia s jednou odbočkou, dĺžka odbočiek sa zmenila z 5m na 20m.

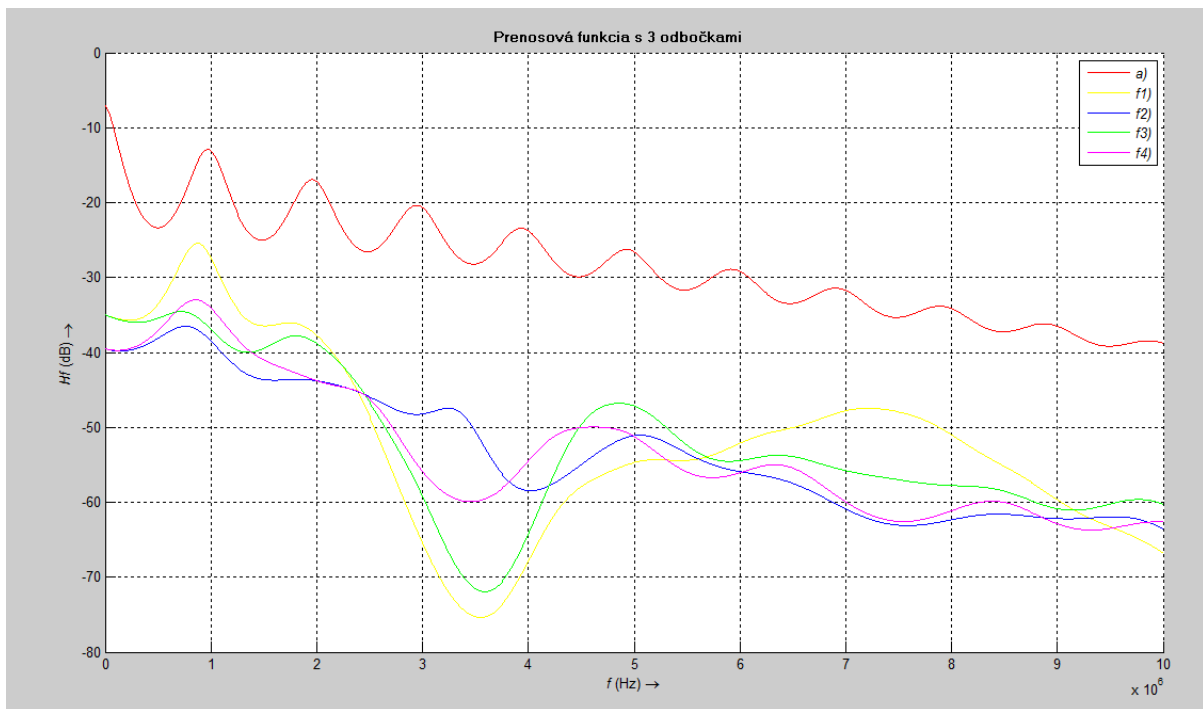




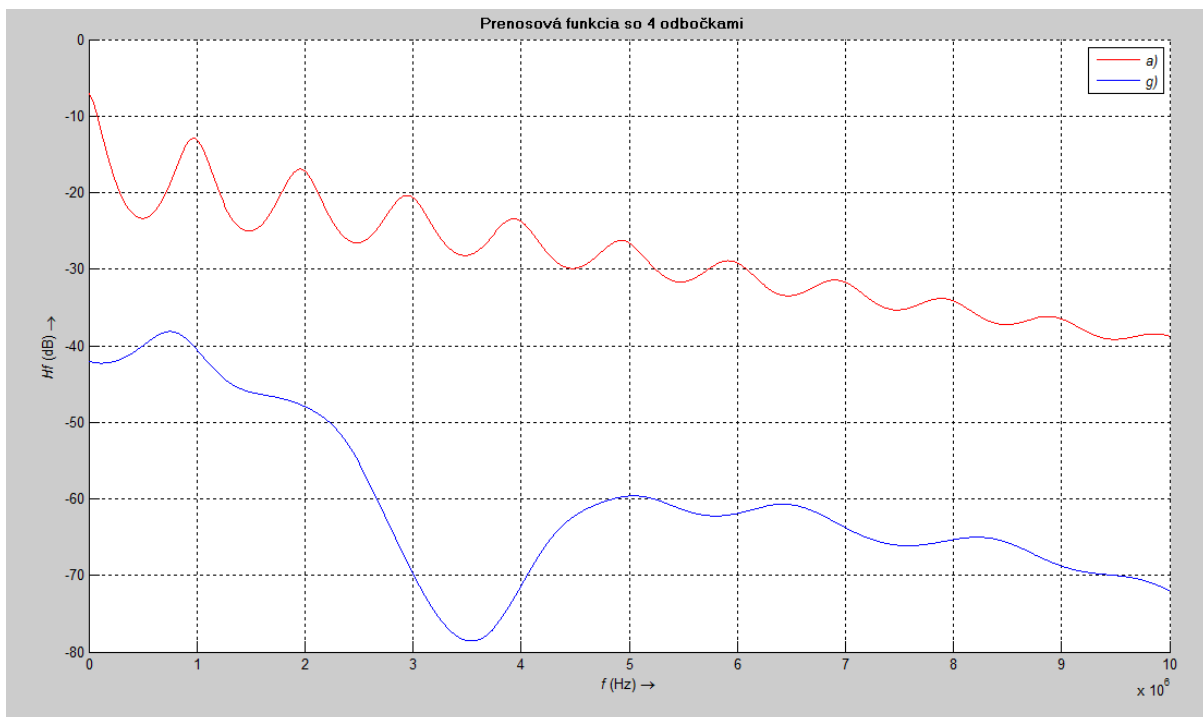
Obr. 7.7: Prenosová funkcia s jednou odbočkou, impedancia odbočiek sa zmenila z  $100 \Omega$  na  $250 \Omega$ .



Obr. 7.8: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami.



Obr. 7.9: Prenosová funkcia s tromi odbočkami.



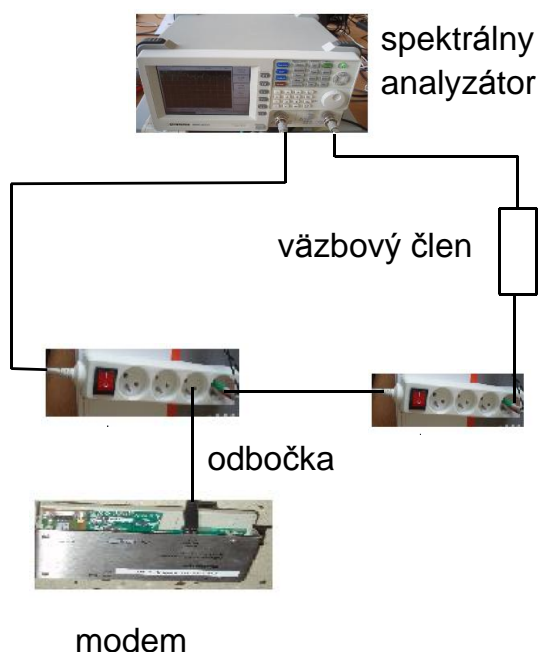
Obr. 7.10: Prenosová funkcia so štyrmi odbočkami.

# 8 Praktické merania prenosovej funkcie

## 8.1 Merania s jednou odbočkou

Na zistenie vplyvu väzbových členov MCB10.2 a ICU-438 na prenosovú funkciu boli vytvorené topológie zapojenia pre merania s jednou odbočkou, vid'. obr. 8.2. Pri tomto meraní boli použité tieto meracie prístroje:

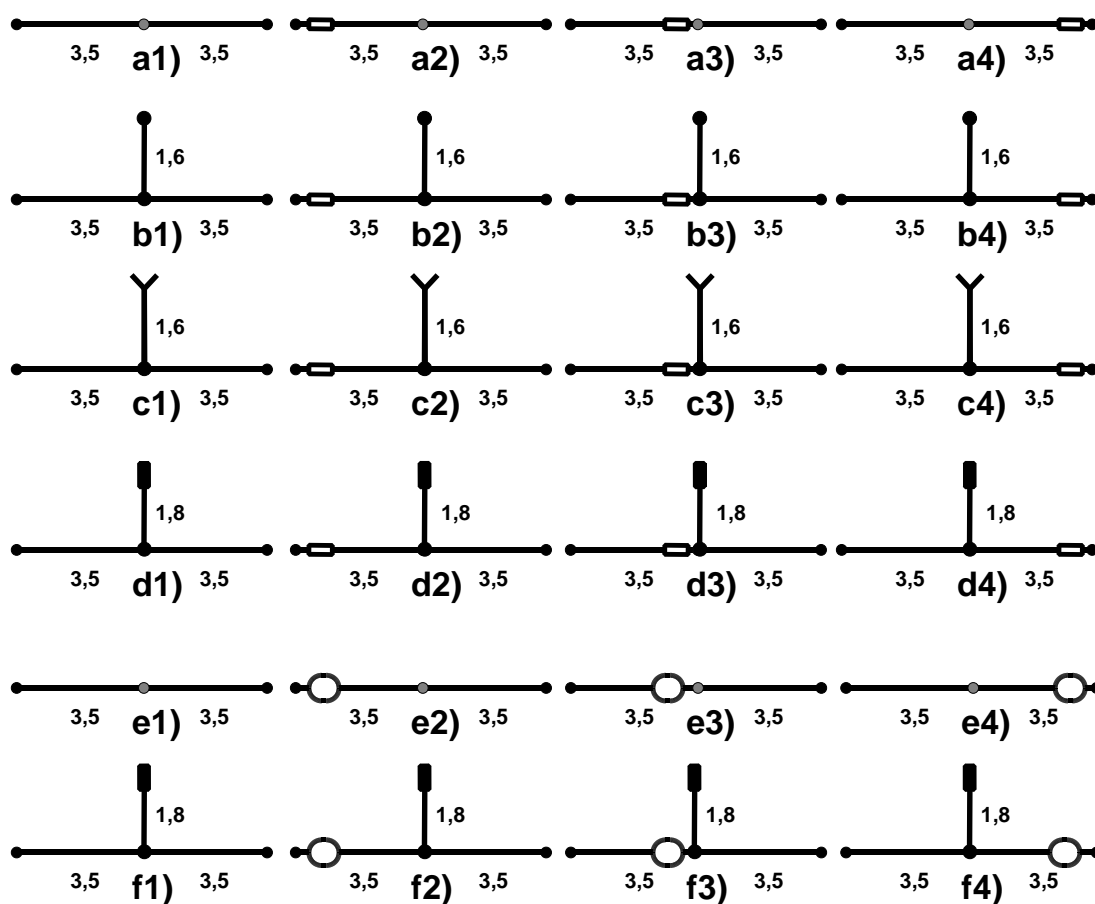
- Spektrálny analyzátor GSP-830
- Vázbové členy (MCB10.2 a ICU-438)
- Dve predlžovacie káble (3,5m dlhé)
- Počítač s nainštalovaným softvérom Eagleshot
- Modem MT39-L1 verzia R od firmy ModemTec



Obr. 8.1: Schéma merania prenosovej funkcie s jednou odbočkou.

Pred začiatkom merania bolo potrebné nainštalovať do počítača softvér Eagleshot, ktorý slúži k prenosu dát zo spektrálneho analyzátoru do počítača. Následne bol zostavený obvod podľa schémy na obr. 8.1. Zo vstupu spektrálneho analyzátoru bola na začiatku merania pripojený predlžovací kábel dlhý 3,5m a na neho bol napojený druhý predlžovací kábel (3,5m), v ktorom bol zapojený modem. Ten spĺňal funkciu odbočky, ktorá má

reálnu impedanciu. Druhý predlžovací kábel v poradí bol privedený na výstup spektrálneho analyzátora. Vázbový člen bol zapojený medzi spektrálnym analyzátorom a predlžovacím káblom, prípadne medzi predlžovacími káblami. Ako odbočka v tomto vedení bol použitý okrem modemu kábel dlhý 1,6 m, na ktorom bol pripevnený väzbový člen ICU-438. Tento kábel bol pri meraniach zapojený nakrátko a naprázdno. Odmerané hodnoty sú spracované v grafoch a taktiež aj v skriptoch programu Matlab.



Legenda: ■ - modem    ▭ - MCB10.2    ○ - MCB10.2

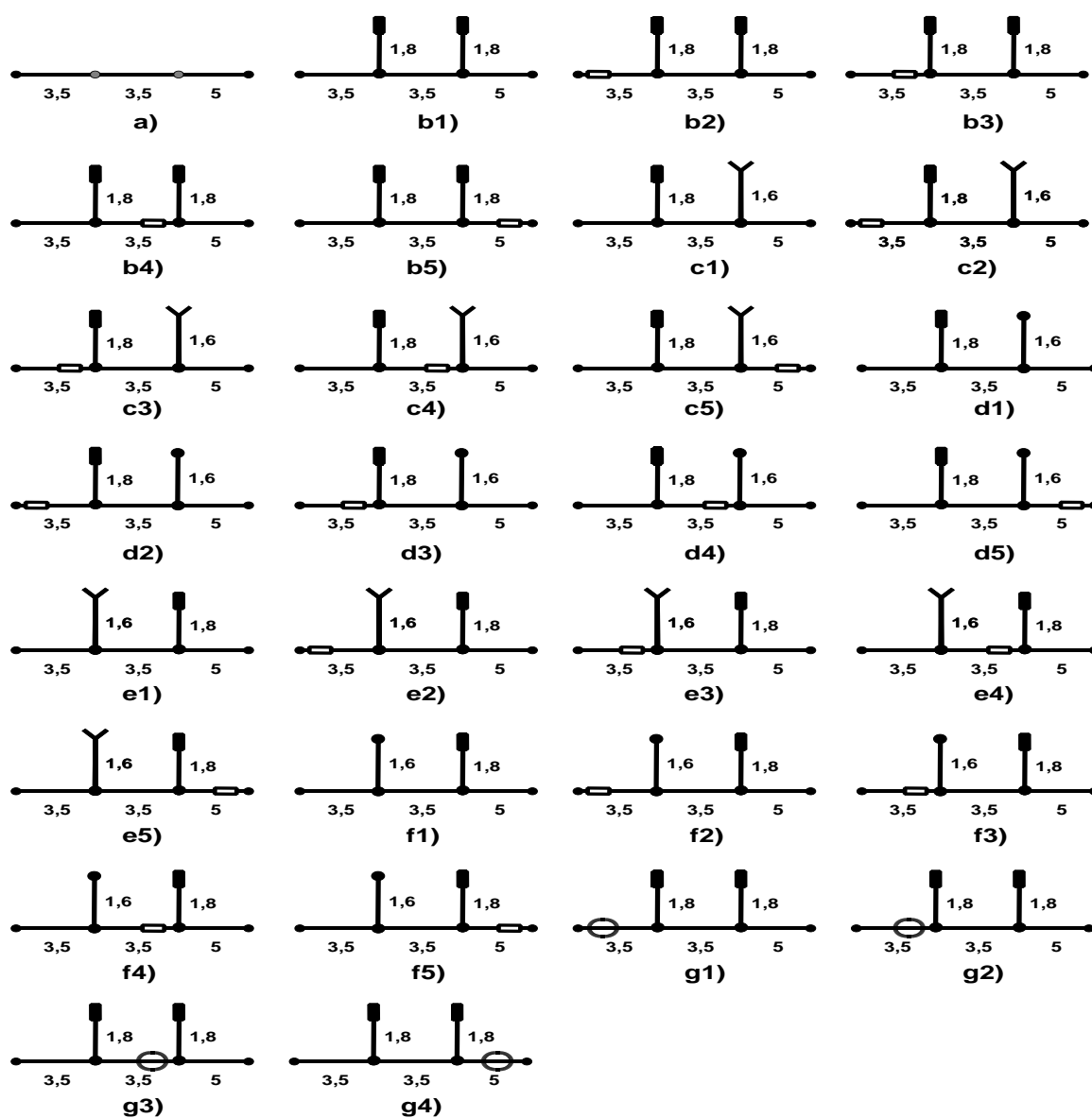
┆ - kábel nakrátko    Y - kábel naprázdno

Obr. 8.2: Zjednodušená schéma zapojenia väzbového člena pri meraniach prenosovej funkcie.

## 8.2 Merania s dvoma odbočkami

Pri meraní s dvoma odbočkami bolo oproti meraniu s jednou odbočkou do obvodu pridaný ďalší predlžovací kábel, ktorý tvoril ďalšiu odbočku v tejto sieti. Ako odbočka boli

v tomto prípade dva modemy a kábel, ktorý bol použitý aj pri prvom meraní. Zjednodušená schéma je zobrazená na obr. 8.3.



Obr. 8.3: Zjednodušená schéma pri meraniach s dvojitou odbočkou.

### 8.3 Zhodnotenie výsledkov meraní

Pri hodnotení výsledkov v tejto práci, boli grafy kvôli prehľadnosti upravené. V grafoch nie sú všetky namerané hodnoty. Tie je možné si pozrieť v skriptoch, ktoré sú na priloženom CD.

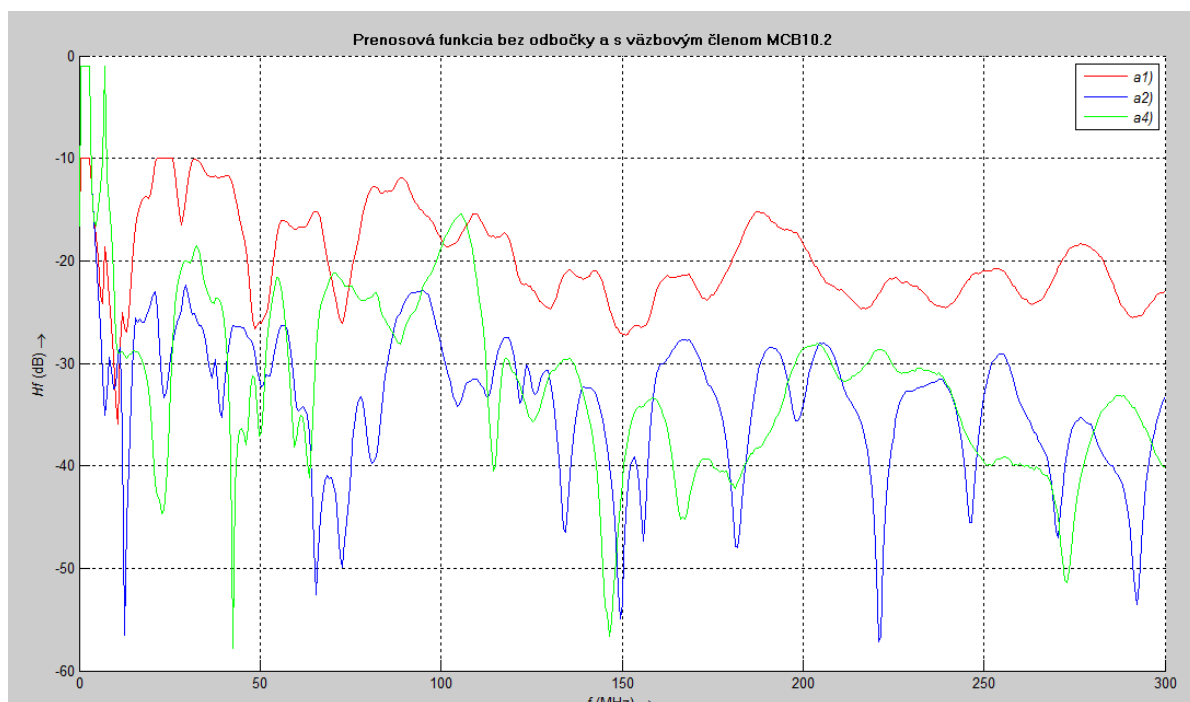
Pre navrhnuté topológie, na obr. 8.2 a obr. 8.3, boli spravené merania a výsledky je možné vidieť na obrázkoch. Merania boli porovnávané na základe rovnakej topológie, v ktorej sa menilo umiestnenie väzbového člena. Vázbový člen sa nachádzal vždy na začiatku, pred každou odbočkou a na konci vytvoreného vedenia. Prenos bol zameraný taktiež v každej topológii bez väzbového člena. Pre označenie topológií platí, že každé písmeno ako napríklad a2), označuje topológiu, a číslo v tomto označení hovorí o pozícii väzbového člena v tejto topológii. V tomto prípade je pozícia člena na začiatku, za vstupom spektrálneho analyzátora.

Na obr. 8.4 sú výsledky merania pre topológiu bez odbočky a s členom MCB10.2 zapojeným na začiatku a na konci vedenia. Prenos sa zhoršil oproti prenosu bez člena. To platí aj pri zapojení odbočky do vedenia. Aj napriek zhoršeniu prenosu po pridaní odbočky bez člena, po zapojení člena MCB10.2 sa v porovnaní s topológiou bez odbočky a s členom prenos nezhoršil. Na niektorých úsekoch dochádza aj k zvlneniu. Pre väzbový člen ICU-438 je prenosová funkcia viac zvlnená ako v prípade MCB10.2. Člen ICU-438, ktorý sa nachádza na začiatku vedenia a odbočku tvorí modem, má v rozmedzí 50-100 MHz lepší prenos ako bez tohto člena v danej topológii.

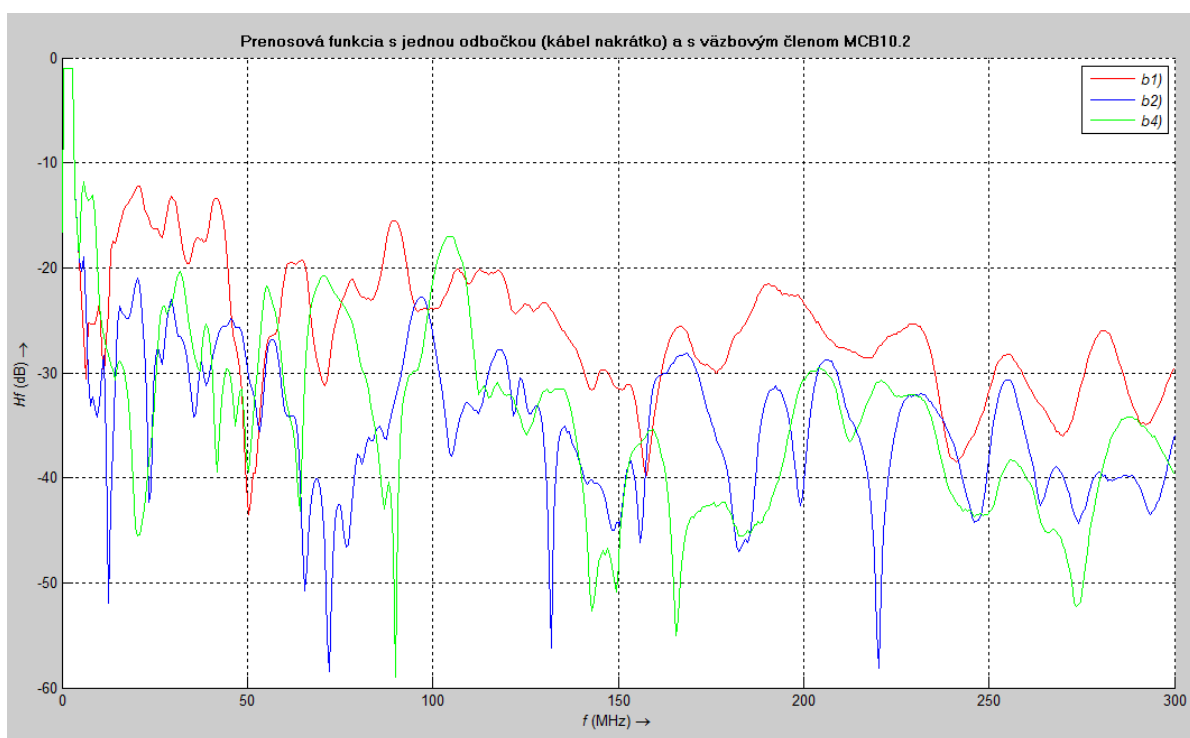
Pri zapojení dvoch odbočiek vo vedení je najväčšie zvlnenie v topológii s väzbovým členom ICU-438. Medzi väzbovými členmi v kvalite prenosu nie sú veľké rozdiely. Člen MCB10.2 v zapojení s dvoma odbočkami má najlepší prenos v topológiách, kde väzbový člen je zapojený hneď na začiatku vedenia. Dosahuje kvalitnejší prenos, ako keď sa člen vo vedení nenachádza. Zvlnenie je v prípade zapojenia modemov v odbočkách najväčšie pri frekvencii 200-300 MHz. Naopak na frekvenciách 0-150 MHz je zvlnenie väčšie v prípade zapojeného kábla v odbočke.

Vázbové členy ovplyvňujú prenosovú funkciu. Kvalita prenosu, ale záleží aj na počte odbočiek, dĺžke vedenia a pripojenej impedancii na odbočke, ako bolo opísané v predchádzajúcej kapitole. Členy v prípade jednej odbočky v sieti zvyšovali útlm a tým sa znížila kvalita prenosu. Pri dvoch odbočkách sa útlm síce zvýšil, ale vykazoval lepšie výsledky ako pri meraní bez väzbového člena MCB10.2 pri frekvencii 200-300 MHz.

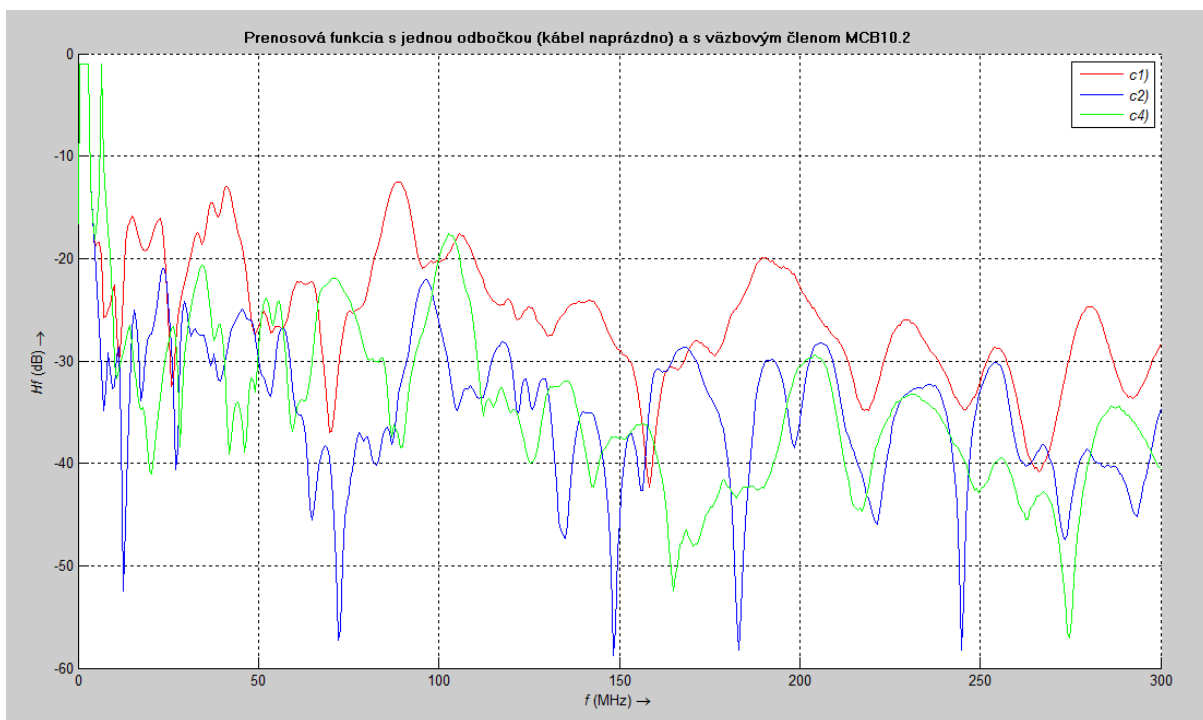
## 8.4 Grafy s jednou odbočkou



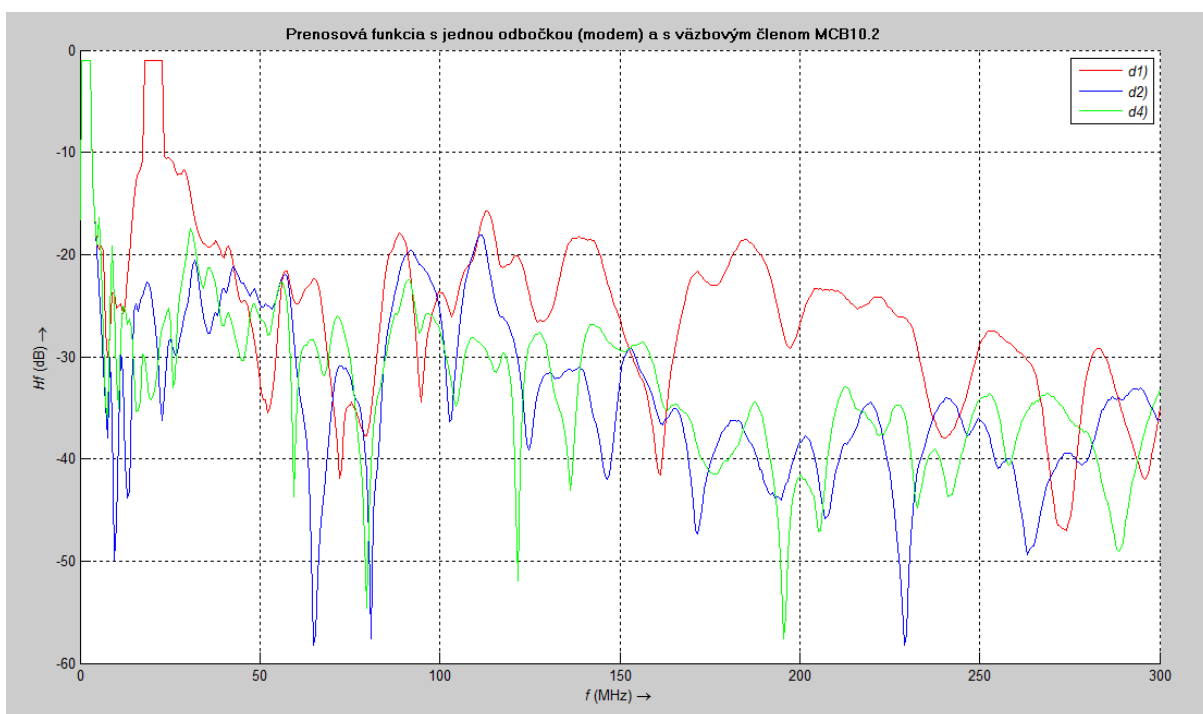
Obr. 8.4: Prenosová funkcia bez odbočky a s väzbovým členom MCB10.2.



Obr. 8.5: Prenosová funkcia s odbočkou (kábel nakrátko) a s väzbovým členom MCB10.2.

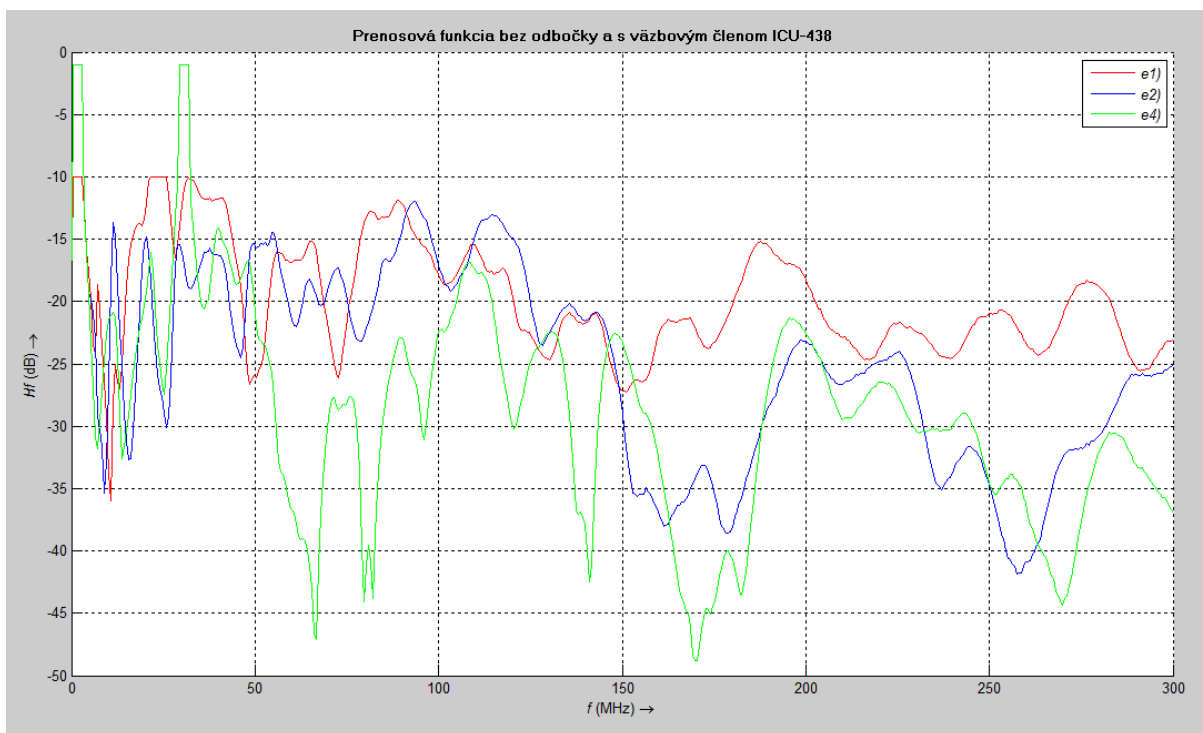


Obr. 8.6: Prenosová funkcia s odbočkou (kábel naprázdno) a s väzbovým členom MCB10.2.

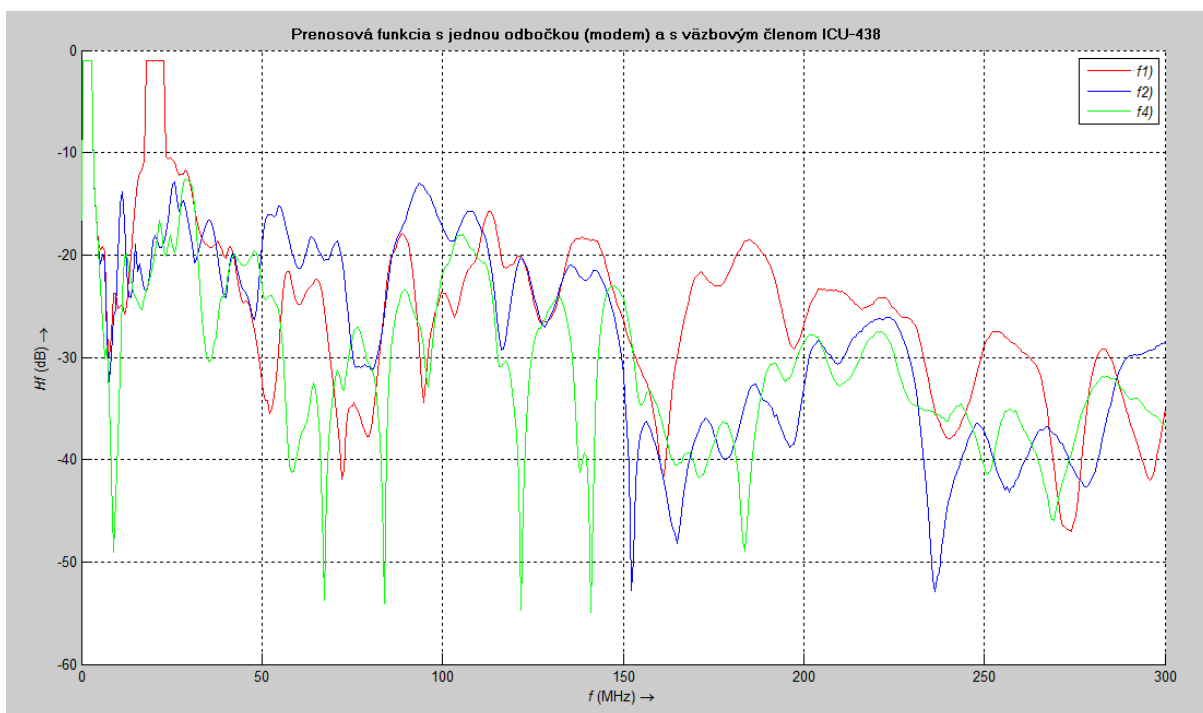


Obr. 8.7: Prenosová funkcia s odbočkou (modem) a s väzbovým členom MCB10.2.



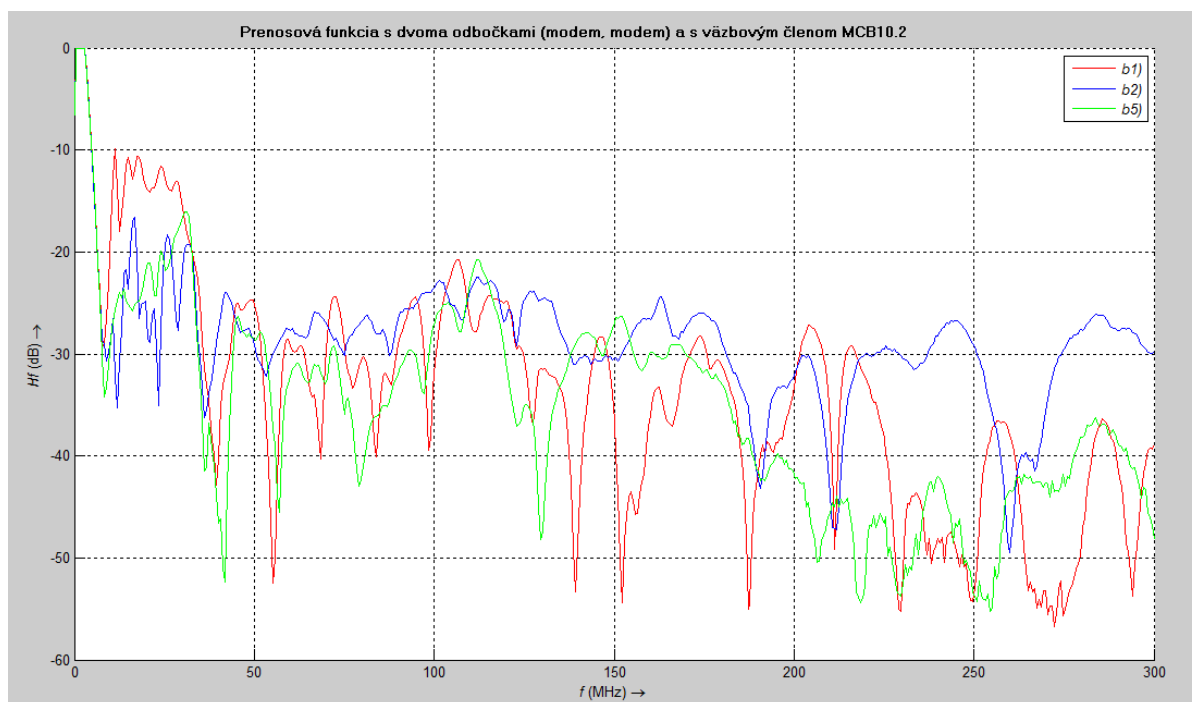


Obr. 8.8: Prenosová funkcia bez odbočky a s väzbovým členom ICU-438.

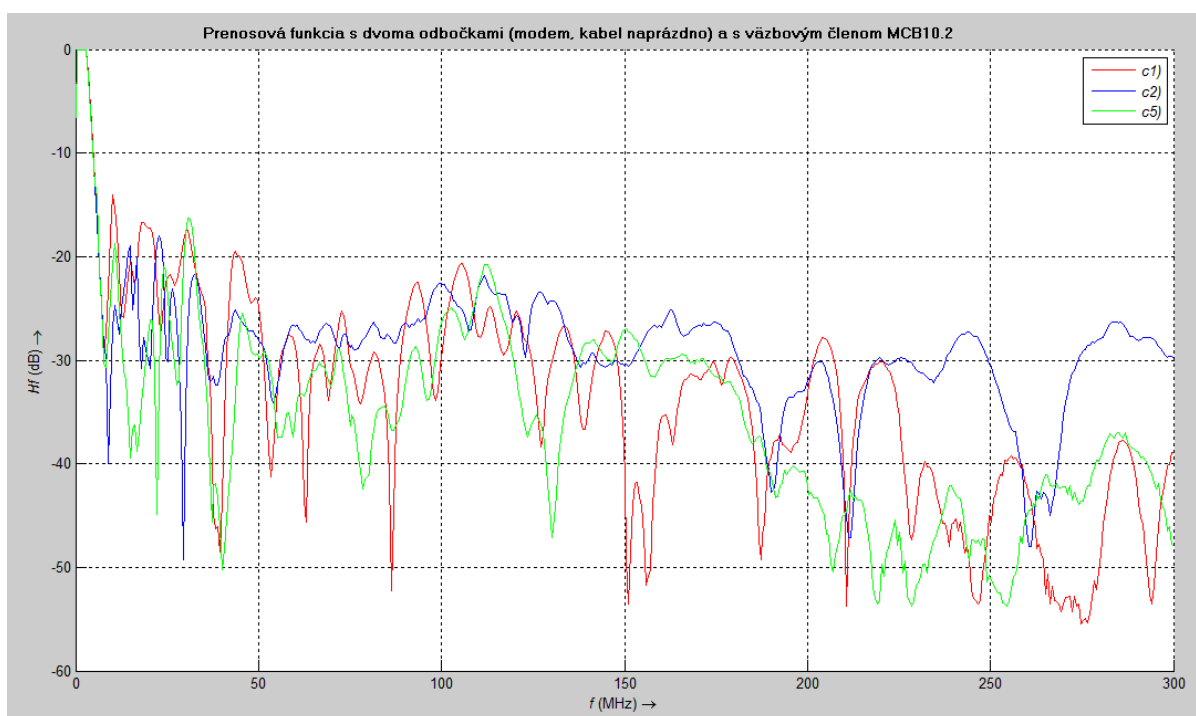


Obr. 8.9: Prenosová funkcia s odbočkou (modem) a s väzbovým členom ICU-438.

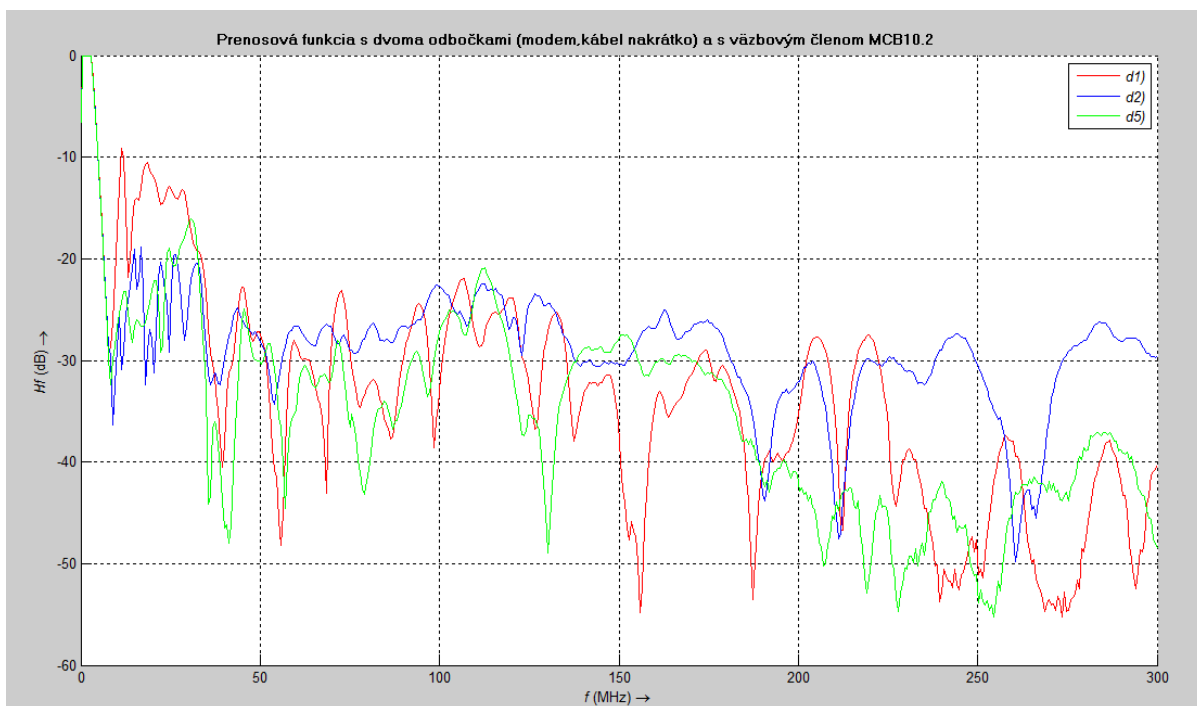
## 8.5. Grafy s dvoma odbočkami



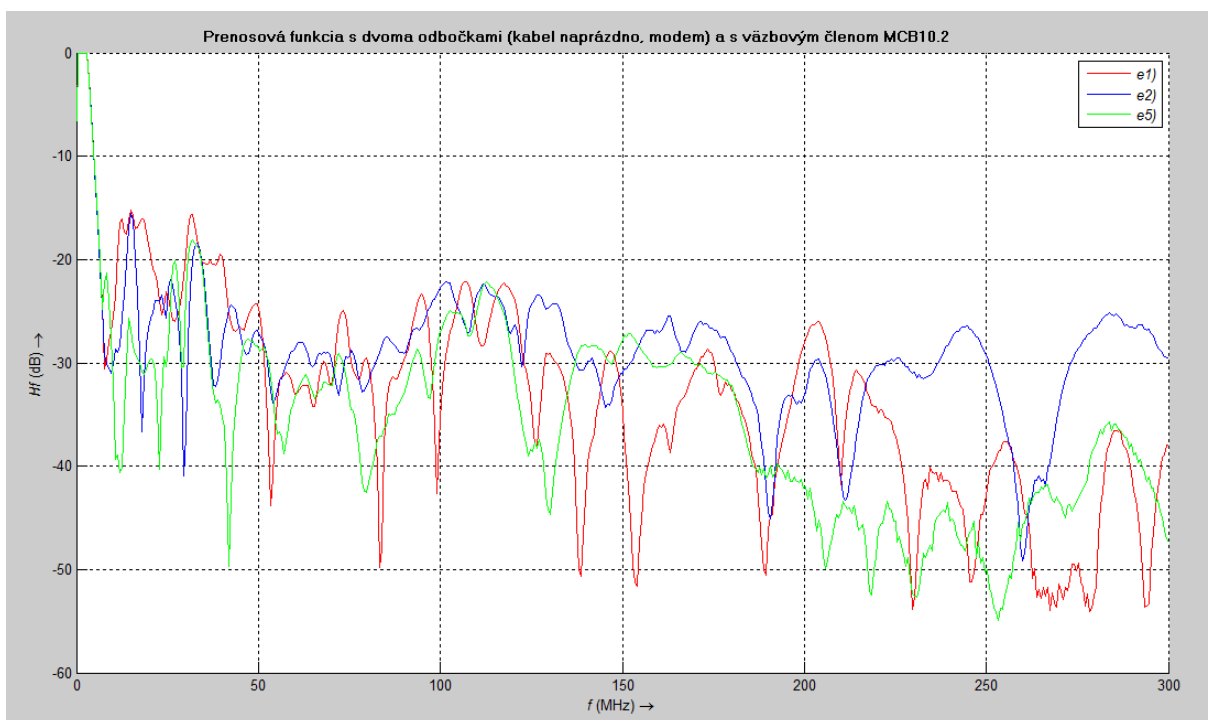
Obr. 8.10: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, modem) a s väzbovým členom MCB10.2.



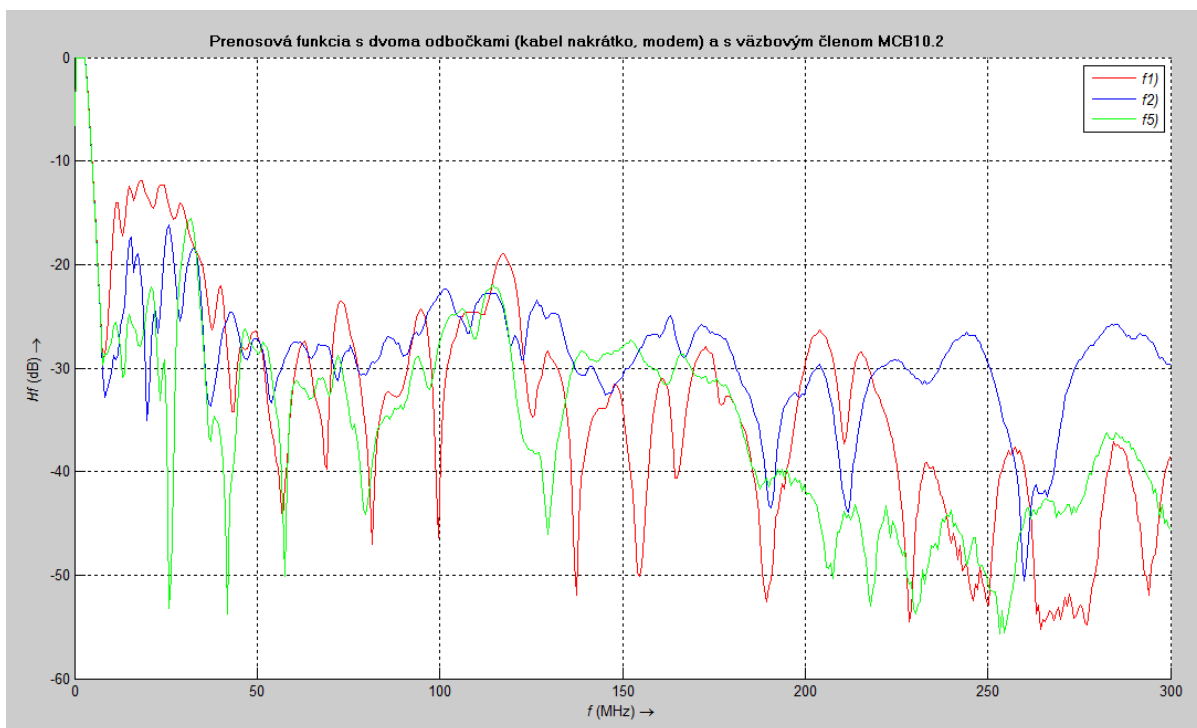
Obr. 8.11: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, kábel naprázdno) a s väzbovým členom MCB10.2.



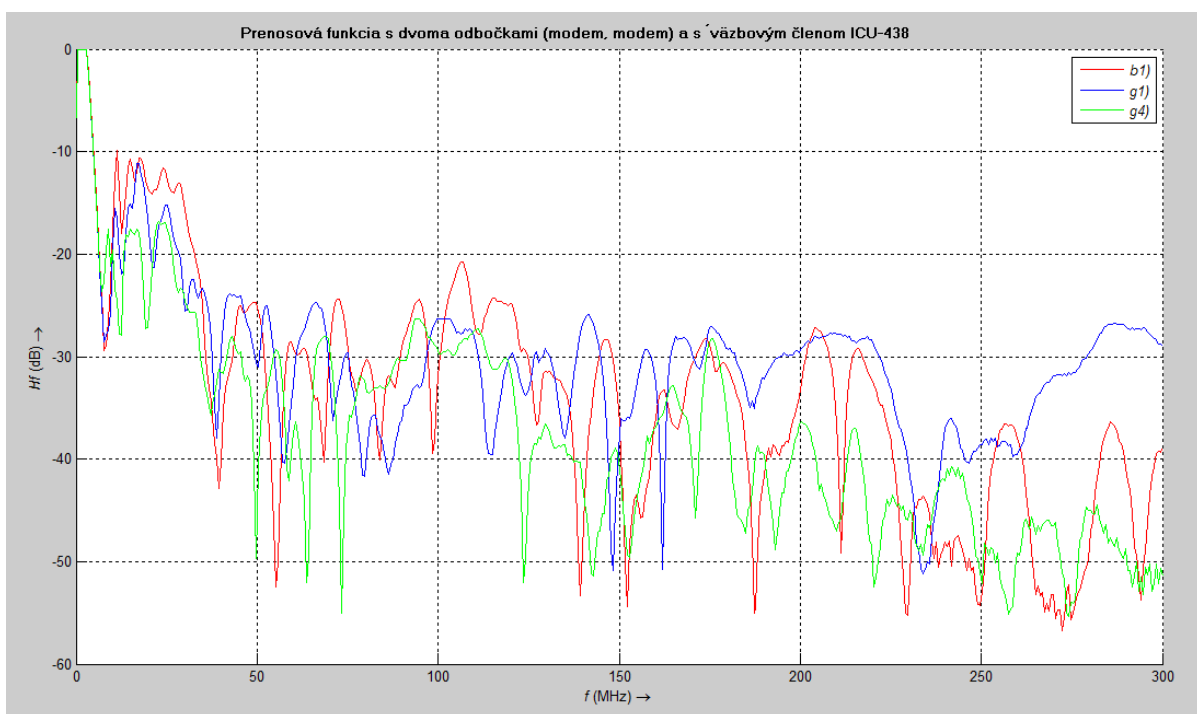
Obr. 8.12: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, kábel nakrátko) a s väzbovým členom MCB10.2.



Obr. 8.13: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (kábel naprázdno, modem) a s väzbovým členom MCB10.2.



Obr. 8.14: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (kabel nakrátko, modem) a s väzbovým členom MCB10.2.



Obr. 8.15: Prenosová funkcia s dvoma odbočkami (modem, modem) a s väzbovým členom ICU-438.

## 8.6 Zhodnotenie

Pre lepšie zoznámenie sa s technológiou PLC boli vytvorené širokopásmová a úzkopásmová siete. V týchto sieťach boli zmerané spektrá komunikácie pomocou osciloskopu. Pre širokopásmovú sieť boli zmerané rýchlosti na fyzickej a aplikačnej vrstve. Tieto namerané rýchlosti zodpovedali rýchlostiam udávanými výrobcami. Pri úzkopásmovej sieti bolo spektrum rušené vŕtačkou. Rušenie spôsobilo zvýšenie hodnôt spektra na frekvenciách 6-150 kHz.

Na modelovanie silnoprúdového vedenia je potrebné pred týmto krokom vypočítať závislosť primárnych parametrov vedenia na frekvencii pre kábel CYKY 3x1,5. Tieto vypočítané primárne parametre zodpovedali teoretickým predpokladom, a preto mohli byť ďalej použité pre výpočet sekundárnych parametrov. Z týchto parametrov boli následne vypočítané modely vedenia. Prenosové funkcie boli vytvorené na základe modelu kaskádnych dvojbranov. Bola zvolená topológia, na základe ktorej bol zistený vplyv na prenos. Prenosová funkcia bola ovplyvňovaná dĺžkou vedenia, dĺžkou odbočky, pripojenou impedanciou a počtom odbočiek vo vedení. Ovplyvňovanie spočívalo vo zvýšení útlmu, teda zhoršení prenosu.

Hlavnou úlohou diplomovej práce bolo zistenie vplyvu väzbových členov MCB10.2 a ICU-438 na tvar prenosovej funkcie vo vytvorenej topológii bez odbočky, s jednou odbočkou a s dvoma odbočkami. Predtým, ale boli odmerané impedancie týchto väzbových členov. Bol navrhnutý model väzbového člena MCB10.2 pomocou prvkov R, L, C na základe nameranej impedancie. Vypočítaná impedancia modelu zodpovedá nameranej impedancii. Pri meraní prenosovej funkcie sa potvrdili predpoklady vypočítaného modelu vedenia, že prenosovú funkciu ovplyvňuje počet odbočiek, veľkosť impedancie pripojenej na odbočke, dĺžka odbočky a vedenia. Pri zapojení väzbových členov do vedenia bolo zistené, v prípade vedenia bez odbočky a s jednou odbočkou, zhoršenie prenosu oproti vedeniu bez zapojeného člena a nárast útlmu. Na určitých frekvenciách dochádzalo k zvlneniu. Pre väzbový člen ICU-438 je prenosová funkcia viac zvlnená ako v prípade MCB10.2. Člen ICU-438, ktorý sa nachádza na začiatku vedenia a odbočku tvorí modem, má v rozmedzí 50-100 MHz lepší prenos ako bez tohto člena v danej topológii.

Pri zapojení dvoch odbočiek vo vedení je najväčšie zvlnenie v topológii s väzbovým členom ICU-438. Člen MCB10.2 v zapojení s dvoma odbočkami má najlepší prenos v topológiách, kde väzbový člen je zapojený hneď na začiatku vedenia, dosahuje kvalitnejší prenos, ako keď sa člen vo vedení nenachádza.

## 5 Záver

Problematika tejto diplomovej práce je zameraná na technológiu PLC. V úvode sú rozobrané vlastnosti silnoprúdových vedení predovšetkým na napäťovej hladine 230/400 V. Práca zahŕňa význam primárnych a sekundárnych parametrov a ich vplyv na prenos. V praktickej časti boli vytvorené širokopásmová a úzkopásmová siete. V týchto sieťach boli zmerané spektrá pri dátovom prenose a pre širokopásmovú sieť zmerané rýchlosti na fyzickej a aplikačnej vrstve.

Ďalšie kapitoly sa venujú analýze väzbových členov MCB10.2 a ICU-438. Bola zameraná ich impedancia a navrhnutý model člena MCB10.2 v programe Pspice na základe nameranej impedancie. Pre vytvorenie modelu vedenia pomocou kaskádnych dvojbranov, boli spočítané primárne a sekundárne parametre vedenia. Pre vytvorenie modelu vedenia pomocou kaskádnych dvojbranov boli vytvorené topológie, boli navrhnuté tak, aby bolo možné porovnať vplyv na základe veľkosti impedancie v odbočke, dĺžky odbočky a počtu odbočiek. Modely vedení boli vytvorené v programe Matlab. Skripty týchto výpočtov sú uložené na priloženom CD. Na prenosovú funkciu mali vplyv impedancia odbočky, dĺžka odbočky, dĺžka vedenia a počet odbočiek.

V poslednej časti bol skúmaný vplyv väzbových členov na tvar prenosovej funkcie. Boli vytvorené topológie, do ktorých boli zapojené väzbové členy do jednotlivých pozícií. Topológie boli vytvorené bez odbočky, s jednou odbočkou a s dvoma odbočkami. Vázbové členy v prípade bez odbočky zhoršovali prenos. V prípade jednej odbočky člen ICU-438 vo frekvenčnom rozsahu 0-100MHz sa zlepšil prenos. Vedenie s dvoma odbočkami, kde väzbové členy boli zapojené na začiatku vedenia, taktiež zlepšili prenosovú funkciu vedenia.

Z týchto meraní vyplynulo, že nameraná prenosová funkcia zodpovedala teoretickým výpočtom. Pri zaradení väzbových členov do topológií bez odbočky a s jednou odbočkou bol zistený nárast útlmu, a teda tieto členy nepriniesli v prenose žiadne zlepšenie. Výnimkou bol člen ICU-438, kedy v jednom prípade zlepšil prenos. V prípade vedenia s dvoma odbočkami a s väzbovými členmi vloženými na začiatku vedenia sa prenos zlepšil vo frekvenčnom pásme 200-300 MHz. Takže v prípade tohto zapojenia boli členy pre kvalitu prenosu prínosom. Celkovo ale väzbové členy neprispievajú podľa týchto výsledkov meraní k zlepšovaniu prenosu.

# Zoznam použitej literatúry

- [1] Rýchly internet cez elektrickú sieť. In: *Hnonline.sk* [online]. 2006 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://inzercia.hnonline.sk/c1-18480770->
- [2] HRASNICA H.; HAIDINE A.; LEHNERT R. *Broadband Powerline Communications Networks*. England: Wiley, 2004. 275 s. ISBN 10: 0-470-85741-2
- [3] JIŘÍ PETERKA, Jiří. Internet ze zásuvky 230 V?. *LUPa* [online]. 2003, 3, [cit. 2011-12-15]. Dostupný z WWW: <http://www.lupa.cz/clanky/internet-ze-zasuvky-230-v/>.
- [4] Zeman, V. *Vyšší techniky datových přenosů - Přenosová vedení*, část skript FEKT VUT v Brně, Brno
- [5] Blažek, V., Skala, P. *Distribuce elektrické energie*, skripta FEKT VUT v Brně, Brno
- [6] Zeman, V. *Vyšší techniky datových přenosů*, část laboratorních skript FEKT VUT v Brně, Brno
- [7] *Www.wifi.aspa.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Wifi.aspa. Dostupné z WWW: <http://wifi.aspa.cz/amh-201f-head-end-repeater-32-mac-pripojeni-na-koax-z65564/>.
- [8] *Www.wifi.aspa.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Wifi.aspa. Dostupné z WWW: <http://wifi.aspa.cz/agw-200-system-pro-konfiguraci-spravu-a-management-z87763/>.
- [9] *Www.wifi.aspa.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Wifi.aspa. Dostupné z WWW: <http://wifi.aspa.cz/amh-200-modem-z65567/>.
- [10] TAKYONET. In: *TAKYONET* [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.takyo.net/vazebni-cleny/>

- [11] ATD, spol. s r.o.: Vazební členy (můstky). *ATD, spol. s r.o.* [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.atd.cz/index.php/lonwoks/vazebni-leny-mstky.html>
  
- [12] Informace pro uživatele systému PowerLine - Defidev/DS2. *Aspa* [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: [http://www.luxus.cz/dokumenty/predstaveni\\_technologie\\_defidev.pdf](http://www.luxus.cz/dokumenty/predstaveni_technologie_defidev.pdf)
  
- [13] MIŠUREC, Jiří a Petr MRÁKAVA. Modely silnoproudých vedení pro počítačovou simulaci přenosu dat technologií PLC. *Elektrorevue* [online]. 2010, č. 121 [cit. 2012-05-22]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/teoreticka-elektrotechnika/0/modely-silnoproudych-vedeni-pro-pocitacovou-simulaci-prenosu-dat-technologiei-plc/>
  
- [14] *Modelování silnoproudých vedení I – metody* [online]. 2010 [cit. 2012-05-22]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010070001>
  
- [15] *Modelování silnoproudých vedení II – simulace ukázkové sítě* [online]. 2010 [cit. 2012-05-22]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010070002>
  
- [16] ESMAILIAN, Tooraj, Frank R. KSCHISCHANG a P. Glenn GULAK. In-building power lines as high-speed communication channels: channel characterization and a test channel ensemble. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS* [online]. 2003, č. 16 [cit. 2012-05-22]. DOI: 10.1002/dac.596. Dostupné z: <http://www.eecg.utoronto.ca/~gulak/papers/Esmailian03.pdf>
  
- [17] MODELLING OF INDOOR LOW VOLTAGE POWER-LINE CABLES IN THE HIGH FREQUENCY RANGE. [Http://www.isplc.org/docsearch/Proceedings/2002/pdf/10110131.pdf](http://www.isplc.org/docsearch/Proceedings/2002/pdf/10110131.pdf) [online]. 2002, č. 1 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.isplc.org/docsearch/Proceedings/2002/pdf/10110131.pdf>



- [18] Ielektra.cz. *Ielektra.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z:  
<http://www.ielektra.cz/kabel-cyky-j-3x15/d-76008/>.

# Zoznam použitých skratiek a symbolov

## Skratky

AP	Prístupový bod
ASK	Amplitude Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CFS	Carrier Frequency Systems
CPE	Customer Premises Equipment
FSK	Frequency Shift Keying
HE	Head-end
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
NMS	Network Management System
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	PowerLine Communications
Powernet-EIB	European Installation Bus
REP	Repeater
RCS	Ripple Carrier Signaling
SDH	Synchronous Digital Mierarch
USB	Universal Serial Bus
VoIP	Voice over Internet Protocol
WLL	Wireless local loop
WAN	Wide Area Network

## Symboly

$a$	Vzdialenosť vodičov
$a_{11}$	Parametre matice
$A$	Matica prenosových parametrov

<b><math>ABCD</math></b>	Matica prenosových parametrov
$A$	Útlm
$B$	Kapacitná susceptancia
$B_k$	Kapacitná susceptancia vedenia na jednotku dĺžky
$B_t$	Kapacitná susceptancia (u transformátoroch)
$C$	Kapacita
$C_i$	Faktor útlmu
$C_p$	Provozná kapacita
$d$	Priemer vodiča
$d_{12}$	Osová vzdialenosť vodičov
$d_{13}$	Osová vzdialenosť vodičov
$d_{23}$	Osová vzdialenosť vodičov
$f$	Frekvencia
$f_k$	Kritická frekvencia
$f_s$	Najvyššia frekvencia
$G$	Zvod (konduktancia)
$G_0$	Zvod pri jednosmernom napätí medzi vodičmi
$g_i$	Váha cesty
$G_k$	Konduktancia vedenia na jednotku dĺžky
$H(f)$	Prenosová funkcia
$h(t)$	Impulzová odozva
$i$	Cesta
$id$	Šírka izolácie
$j$	Imaginárna jednotka
$k_0$	Činiteľ zväčšenia odporu vplyvom okolných vodičov
$k_b$	Činiteľ zväčšenia odporu vplyvom blízkosti vodičov
$k_g$	Koeficient striedavého prúdu
$k_s$	Činiteľ zväčšenia odporu vplyvom povrchového javu
$k_g$	Vplyv rozdielnej teploty na rezistanciu oproti teplote $\vartheta_0$
$L$	Indukčnosť (reaktancia)
$l$	Dĺžka vodiča
$l_1$	Dĺžka vodiča
$L_{p1}$	Indukčnosť vodičov trojfázového nesúmerného vedenia

$L_{p2}$	Indukčnosť vodičov trojfázového nesúmerného vedenia
$L_{p3}$	Indukčnosť vodičov trojfázového nesúmerného vedenia
$N$	Počet ciest k prijímaču
$n_e$	Elementárne články
$p$	Činiteľ typu prvku vedenia
$R$	Rezistencia (merný odpor)
$r$	Polomer vodiča
$R_0$	Jednosmerný odpor vedenia
$R_k$	Rezistencia vedenia na jednotku dĺžky
$R_\vartheta$	Rezistencia pri teplote $\vartheta$
$R_{\vartheta_0}$	Rezistencia pri teplote $\vartheta_0$
$s$	Plocha prierezu
$S$	Prierez žíl
$T_i$	Meškanie
$t_d$	Meškanie článku
$T_D$	Celkové meškanie
$U_s$	Napätie zdroja
$Z$	Pozdĺžna impedancia
$Z_{br}$	Impdancia zariadenia na odbočke
$Z_c$	Charakteristická impedancia
$Z_{eq}$	Impedancia odbočky
$Z_{ser}$	Impedancia sériovej časti modelu
$Z_{par}$	Impedancia paralelnej časti modelu
$z_k$	Pozdĺžna impedancia vedenia
$Y$	Priečna admitancia (u vedeniach)
$y_k$	Priečna admitancia vedenia
$X$	Induktívna reaktancia
$X_k$	Induktívna reaktancia vedenia na jednotku
$\alpha$	Merný útlm
$\alpha_R$	Teplotný súčiniteľ odporu
$\beta$	Merný fázový posuv
$\beta_R$	Teplotný súčiniteľ odporu
$\varepsilon_r$	Relatívna permitivita

$\varepsilon_0$	Permitivita materiálu vodiča
$\sigma$	Merná vodivosť medi
$\delta$	Stratový činiteľ
$\mu_0$	Permeabilita vákua
$\mu_{rv}$	Relatívna permeabilita
$\mu_r$	Relatívna permeabilita materiálu vodiča
$\gamma$	Merný činiteľ prenosu
$\gamma_{br}$	Merný činiteľ prenosu pre odbočku
$\pi$	Ludolfovo číslo
$\rho_0$	Rezistivita
$\vartheta_0$	Teplota
$\vartheta$	Teplota
$\omega$	Uhlová frekvence

# Zoznam príloh

Zdrojové kódy pre výpočet impedancií

icu348\_zmerana\_impedancia.m – Zmeraná impedancia väzbového člena ICU-438

mcb\_zmerana\_impedancia.m – Zmeraná impedancia väzbového člena MCB10.2

model\_mcb\_imp.m – Vypočítaná impedancia navrhnutého modelu člena MCB10.2

model\_vaz\_clenu\_imp.m – Vypočítaná impedancia teoretického modelu člena

Vypočítané prenosové funkcie a výpočet parametrov

vyp\_RLCG.m – Výpočet primárnych a sekundárnych parametrov

vyp\_s1odb\_jednoducha.m – Výpočet funkcie s 1 odbočkou

vyp\_s1odb\_jednoducha\_dlzka.m - Výpočet funkcie s 1 odbočkou pri zmene dĺžky odbočky

vyp\_s1odb\_zlozena.m - Výpočet funkcie s 1 odbočkou pri zmene impedancie odbočky

vyp\_s2odb\_zlozena.m - Výpočet funkcie s 2 odbočkami

vyp\_s3odb\_zlozena.m - Výpočet funkcie s 3 odbočkami

vyp\_s4odb\_zlozena.m - Výpočet funkcie s 4 odbočkami

Zmeranie prenosovej funkcie

icu\_1\_bez\_odbocky.m – Zmeraná funkcia bez odbočky s členom ICU-438

icu\_1odbocka\_modem.m - Zmeraná funkcia s 1odbočkou (modem) s členom ICU-438

mcb\_1\_bez\_odbocky.m - Zmeraná funkcia bez odbočky s členom MCB10.2

mcb\_1odbocka\_modem.m - Zmeraná funkcia s 1odbočkou (modem) s členom MCB10.2

mcb\_1odbocka\_naprazdno.m - Zmeraná funkcia s 1odbočkou (kábel naprázdno) s členom  
MCB10.2

mcb\_1odbocka\_nakratko.m - Zmeraná funkcia s 1odbočkou (kábel nakrátko) s členom  
MCB10.2

icu\_modem\_modem.m - Zmeraná funkcia s 2 odbočkami (modem, modem) s členom  
ICU-438

mcb\_kabel\_nakratko\_modem.m - Zmeraná funkcia s 2 odbočkami (kábel nakrátko, modem)  
s členom MCB10.2

mcb\_kabel\_naprazdno\_modem.m - Zmeraná funkcia s 2 odbočkami (kábel naprázdno,  
modem) s členom MCB10.2

mcb\_modem\_kabel\_nakratko.m - Zmeraná funkcia s 2 odbočkami (modem, kábel nakrátko)  
s členom MCB10.2

mcb\_modem\_kabel\_naprazdno.m - Zmeraná funkcia s 2 odbočkami (modem, kábel  
naprázdno) s členom MCB10.2

mcb\_modem\_modem.m - Zmeraná funkcia s 2 odbočkami (modem, modem) s členom  
MCB10.2